

引用格式: 李昊宣, 刘朝辉, 程昱博. 钒基氧化物雷达与红外隐身材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(4): 12-28.

LI Haoxuan, LIU Zhaohui, CHENG Yubo. Research progress on vanadium-based oxide radar and infrared stealth materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(4): 12-28.

## 钒基氧化物雷达与红外隐身材料研究进展

李昊宣, 刘朝辉\*, 程昱博

(西安工业大学 兵器科学与技术学院, 西安 710021)

**摘要:** 雷达与红外隐身材料对于提升装备隐身性能具有重要意义, 近年来, 钒基氧化物因其独特的热致相变特性、优异的红外辐射调制能力在雷达与红外隐身领域展现出广阔的应用前景。本文从多组分设计、结构调控、元素掺杂改性 3 个维度, 系统阐述了二氧化钒( $\text{VO}_2$ )、三氧化二钒( $\text{V}_2\text{O}_3$ )、五氧化二钒( $\text{V}_2\text{O}_5$ )基隐身材料的性能优化方法及机制。此外, 本文提出了钒基氧化物隐身材料研究未来的 5 大关键发展方向: (1) 新型异质结构设计, 通过结构调控设计克服钒基氧化物固有缺陷以增强隐身性能; (2) 人工智能辅助材料设计, 将利用机器学习建模成分-结构-性能关系, 精准预测性能参数以缩短材料研发周期; (3) 多元损耗机制协同优化, 旨在耦合电导损耗、介电损耗与磁损耗实现协同增强, 最大化提升隐身性能; (4) 复杂界面表征, 针对价态丰富导致的复杂界面, 强化界面表征以揭示复合体系吸波机理; (5) 宽频段自适应隐身, 基于热致相变特性, 开发兼具宽频段与自适应响应的隐身材料。

**关键词:** 钒基氧化物; 红外隐身; 雷达隐身; 相变材料

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000093

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000093

中图分类号: TB34; V259

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)04-0012-17

## Research progress on vanadium-based oxide radar and infrared stealth materials

LI Haoxuan, LIU Zhaohui\*, CHENG Yubo

(School of Defense Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Radar and infrared stealth materials play a crucial role in enhancing the stealth performance of equipment. In recent years, vanadium-based oxides have shown broad application prospects in the field of radar and infrared stealth due to their unique thermochromic phase transition properties and excellent infrared radiation modulation capabilities. This paper summarizes the research progress of vanadium-based oxide radar and infrared stealth materials at home and abroad. From three dimensions of multi-component design, structural regulation and element doping modification, it systematically elaborates on the performance optimization methods and mechanisms of vanadium dioxide, vanadium trioxide and vanadium pentoxide-based stealth materials. Furthermore, this paper proposes five key directions for future research on vanadium-based oxide stealth materials: (1) the design of new heterostructure, which aims to overcome the inherent defects of vanadium-based oxides through structural regulation to enhance stealth performance; (2) artificial intelligence-assisted material design, which will utilize machine learning to model the composition-structure-performance relationships and accurately predict performance parameters, thereby shortening the material development cycle; (3) the synergistic optimization of multiple loss mechanisms, intended to couple conductive loss, dielectric loss and magnetic loss for synergistic enhancement, maximizing the improvement of stealth performance; (4) the characterization of complex interfaces, which focuses on strengthening interface characterization to reveal the wave-absorbing mechanism of composite systems in view of the complex interfaces caused by rich valence states; (5) broadband adaptive stealth, which involves developing stealth materials with both broadband and adaptive response capabilities based on thermally induced phase transition characteristics.

**Key words:** vanadium-based oxide; infrared stealth; radar stealth; phase change material

随着探测技术的不断发展,各种作战平台态势感知能力不断增强,复合探测手段的广泛应用已然使得单一频段隐身材料逐渐落伍。为了获得更好的战场生存性与作战效能,现代作战平台对于“多频段隐身”的需求与日俱增。其中雷达隐身与红外隐身已然成为当今隐身技术的主要研究方向<sup>[1-2]</sup>,对于雷达隐身,常利用外形设计与涂覆吸波材料来减小雷达散射截面<sup>[3]</sup>,提高武器装备在应对雷达探测手段时的生存与突防性能,从而获得作战效能的提升<sup>[4]</sup>。因此,应用电磁波吸收材料是长期以来实现雷达隐身的重要手段之一。对于红外隐身,一般通过控制隐身体的绝对温度与背景温度相匹配,或涂覆低红外发射率材料来降低红外可探测性<sup>[5]</sup>,因此低红外发射率与优异吸热性能成为红外隐身材料的重要指标。

传统雷达隐身材料一旦确定设计指标频段,其吸收频段固定且无法改变,仅仅不同频段的雷达波就可让隐身材料效能减弱甚至失效。由此可以看出传统雷达隐身材料无法应对多频段探测技术,故具有宽频段的自适应雷达隐身材料逐渐受到学者的广泛关注<sup>[6]</sup>。而钒基氧化物中的 $\text{VO}_2$ 具有电导率与红外发射率随着温度升高而改变的相变特性<sup>[7]</sup>,利用这一特性在多频段雷达/红外隐身材料具有较大应用前景。

钒(V)属于过渡金属元素,其存在有多种价态,与氧结合可以生成不同价态的氧化物。近年来,钒基氧化物在雷达隐身、红外隐身领域均有不同层次的应用及发展,其氧化物主要有 $\text{VO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_3$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、VO等<sup>[8]</sup>,这些氧化物大多数都可实现温度相变,其中 $\text{V}_2\text{O}_3$ 、VO、 $\text{VO}_2$ 的相变温度分别为 $-108.15$ 、 $-147.15$ 、 $68$  °C。并且具有独特的物理、热学和电子特性<sup>[9]</sup>。其中 $\text{VO}_2$ 的相变温度处于常温范围,且相变温度可以通过适量元素掺杂进一步降低。李尧等<sup>[10]</sup>通过掺杂6.0%(原子分数)钨元素时,使 $\text{VO}_2$ 相变温度降为 $28$  °C,对于 $\text{VO}_2$ 常温下的应用具有较大意义。由于 $\text{VO}_2$ 易氧化,目前将其用作隐身材料首要问题是环境稳定性,通过结构调控设计构建核壳结构、多孔结构等,加以多组分设计复合成高性能智能化隐身材料。另外,钒基氧化物中的 $\text{V}_2\text{O}_3$ 同样具有热致相变的特点<sup>[11]</sup>,其常温条件下呈现金属态,为高电导率特性,相比于 $\text{VO}_2$ ,有效避免因相变造成的电导率波动对隐身性能的影响。 $\text{V}_2\text{O}_3$ 在介电损耗型雷达吸波材料中具有一定应用,常通过结构形貌设计、掺杂改性、多组分设计等方式弥补其磁损耗机制缺乏、极化差、

阻抗匹配差等缺陷。 $\text{V}_2\text{O}_5$ 在雷达隐身材料领域也具有一定应用,但相较于前两者电导率和介电损耗较低。其独特的层状结构在电化学储能领域多有应用<sup>[12]</sup>。而在雷达隐身领域, $\text{V}_2\text{O}_5$ 多与高导电材料复合,利用增强的界面极化作用形成宽吸收频段的隐身材料,但存在吸收强度不高,缺少磁损耗机制的问题。

综上所述,钒基氧化物在雷达与红外隐身材料领域具有丰富的应用,且目前对于这类材料总结性文章较少。本文对钒基氧化物雷达与红外隐身材料的相关研究进行综述,从多组分设计、结构调控、掺杂改性三方面归纳总结钒基氧化物隐身材料的研究进展,梳理基于 $\text{VO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_3$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 建立的隐身材料的性能特点与设计理念,最后阐述钒基氧化物隐身材料未来重点发展方向与存在问题。

## 1 雷达隐身材料的吸波机理

雷达探测是目前最主要的目标侦测手段,对雷达隐身频段的研究主要集中在 $2\sim 18$  GHz波段,其工作原理是通过发射电磁波并接受目标的回波来探测目标的位置信息(高度、方向、距离)。为了提高武器装备的战场生存性与突防性能,主要通过涂覆雷达吸波材料、结构化的隐身设计、干扰侦测雷达3种方式来达成一定频段的雷达隐身。而涂覆雷达吸波材料作为应用最广泛的一种方法在隐身设计中占有重要地位。

电磁波在空气中传播遇到媒介时,由于媒介阻抗与自由空间阻抗不匹配,电磁波在空气与媒质界面发生反射,透射波进入媒质内部在其中传播并与媒质发生相互作用而被转换成其他诸如机械能、电能和热能等形式能量消耗掉。雷达吸波材料能够有效吸收电磁波主要有2个条件:一是要优异的阻抗匹配,这是雷达吸波材料损耗电磁波的前提条件,其核心目的是尽可能减少电磁波在材料表面反射,使更多电磁波进入到损耗层;二是利用多种损耗机制尽可能多地衰减入射电磁波,也就是衰减特性,这是雷达吸波材料的核心功能。根据电磁波的损耗机制,基本可分为介电损耗与磁损耗,介电损耗主要来自电导损耗与极化损耗,而磁损耗主要来自磁滞损耗、涡流损耗和共振损耗<sup>[13]</sup>。

雷达隐身材料的综合评价指标可以概括为“薄、轻、宽、强”。薄代表材料厚度薄,指在满足吸波性能的前提下,材料的物理厚度要尽量小,厚度过大会增加装备的结构载荷,甚至影响航空器的

气动布局,且适合厚度会出现振幅相消现象,能够有效损耗电磁波能量<sup>[13]</sup>;轻代表质量轻、密度小,对于航空航天等装备(如隐身战机、导弹、无人机等),过高的密度会给飞行品质和飞行性能造成影响,不利于作战效能的发挥;宽代表其吸收频段宽,指材料在宽频段范围内实现有效吸波(反射损耗 $\leq 10$  dB,对应电磁波能量衰减 $\geq 90\%$ ),对于工作在不同波段雷达均具有良好的隐身性能,避免武器装备因吸收频段单一影响隐身效能;强代表吸收波强度高,要求材料对于入射电磁波的耗散能力尽可能强,强吸收可确保武器装备具有更多的隐身冗余度,以便在面对吸收频段之外的雷达波时降低其回波强度<sup>[14-15]</sup>。

## 2 基于VO<sub>2</sub>的雷达/红外隐身材料

二氧化钒(VO<sub>2</sub>)是一种具有相变特性的材料,且这种相变是可逆的,其电磁参数随温度变化而发生改变(图1)<sup>[16]</sup>,在其相变前呈现低温绝缘相,具有高电阻率,VO<sub>2</sub>呈现单斜晶系结构。当温度升高至相变温度附近时,其晶体结构将会转变为四方晶系结构,且电阻率大幅降低,其电导率变化高达5个数量级并具有优异的导电性<sup>[10]</sup>,其相变后具有作为介电损耗型雷达吸波材料的潜力。值得注意的是,虽然相变后的VO<sub>2</sub>具有高导电性,但往往纯VO<sub>2</sub>不能作为电磁吸波材料,其相变前的无电磁波损耗机制,而相变后四方晶系的VO<sub>2</sub>展示出金属态,高电导率导致对电磁波产生高反射特性,不利于雷达隐身。如能通过多组分设计与结构调控策略协同优化阻抗匹配、降低介电常数与提升损耗能力,并利用热致相变特性,可使VO<sub>2</sub>基雷达隐身材料展现出智能化、可调频的应用潜力。近年来,VO<sub>2</sub>在微观形貌方面取得了显著进展,多种形貌特性包括纳米颗粒<sup>[17-18]</sup>、纳米线<sup>[19]</sup>、空心球体<sup>[20]</sup>

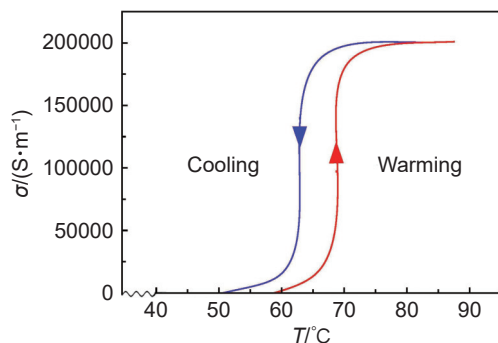


图1 VO<sub>2</sub>的电导率随温度变化图<sup>[16]</sup>

Fig. 1 The conductivity of VO<sub>2</sub> varies with temperature<sup>[16]</sup>

等已被报道,这些复杂形貌特征不仅丰富了VO<sub>2</sub>的物理化学特性,还为其在雷达/红外隐身领域应用提供了重要潜力。例如,纳米颗粒的尺寸效应可优化其相变特性与隐身性能;纳米线一维结构有助于电磁波的散射与吸收,提升雷达隐身性能;空心球体能够有效降低材料密度,同时通过多重反射进一步耗散入射电磁波。这些微观形貌特征均为VO<sub>2</sub>材料在隐身材料中应用开辟了新方向。

VO<sub>2</sub>相变特性不止局限于电磁参数变化,在其相变前后,材料的光学透过率也会随着相变发生与否而改变,这种变化在红外波段尤为突出。而相变前后的红外发射率改变这一特征使得其在红外隐身材料、智能窗户等红外相关领域得到广泛的应用。但是VO<sub>2</sub>相变温度为68 °C,这一温度在很大程度上限制了实际应用。因此,通过掺杂改性来进一步降低相变温度显得十分重要,目前已有多种关于金属离子掺杂的报道实例<sup>[21]</sup>,为这一问题的解决提供了众多可行方案。而将上述红外特性与电导率相变特性相结合,为雷达/红外双波段隐身材料设计提供了极具潜力的思路。

VO<sub>2</sub>中存在VO<sub>2</sub>(A)、VO<sub>2</sub>(B)、VO<sub>2</sub>(M)、VO<sub>2</sub>(R)等多种晶型<sup>[22]</sup>,其中VO<sub>2</sub>(M)是核心相,具有接近室温的相变温度,并可通过掺杂元素改变,使其更加适合目标场景温度变化。目前研究重点主要集中在这一晶型。而VO<sub>2</sub>(R)是其中的高温相,具有近红外透明性,但具有难以保留至室温的问题。VO<sub>2</sub>(A)与VO<sub>2</sub>(B)属于其中的亚稳态相,在实际中难以合成纯相,因而关注较少。本文依据VO<sub>2</sub>基隐身材料功能频段的不同,通过雷达与红外两种不同频段展开介绍。

### 2.1 基于VO<sub>2</sub>的雷达隐身材料

VO<sub>2</sub>由于其独特的温度相变特性在宽频段吸收具有较为明显的优势,但VO<sub>2</sub>在相变前固有的低电导率会限制其在非相变温度区间的电磁损耗能力,需要通过多组分设计来克服。近年来,基于VO<sub>2</sub>的雷达隐身材料已有大量文献报道。由于VO<sub>2</sub>存在易氧化特性、相变前缺乏有效损耗机制等固有缺陷,纯VO<sub>2</sub>很难单独作为雷达隐身材料。其性能优化在很大程度上依赖于结构调控策略与多组分设计。基于此,本文将从结构调控、多组分协同策略、掺杂改性3方面系统性地阐述基于VO<sub>2</sub>雷达隐身材料研究进展。

微观形貌结构调控凭借着对材料结构-性能关系的调控能力,成为雷达隐身材料极具前景的设计方案。而将VO<sub>2</sub>作为雷达隐身材料的首要挑战为

VO<sub>2</sub> 易被氧化成高价态其他钒基氧化物, 导致材料性能失效, 往往需要借助结构调控的方式来提高其化学稳定性, 而核壳结构凭借其自身优势成为典型方案, 其内核可保留 VO<sub>2</sub> 的电磁特性, 外壳则能发挥保护作用, 在提高 VO<sub>2</sub> 基材料化学稳定性的同时, 也能增强雷达隐身性能。Gao 等<sup>[23]</sup> 构建一种核壳结构, 通过多级水热法设计具有半导体异质核壳结构 MoS<sub>2</sub>@VO<sub>2</sub> 复合材料。一方面, 核壳之间形成大量异质界面, 界面处电荷积累与极化行为的显著差异引发强烈的界面极化损耗; 另一方面, 核壳结构强化传导损耗, 促进电磁能向热能的转化。得益于上述机制, 该材料表现出优异的电磁波吸收性能, 最小反射损耗达 -56.78 dB, 且有效吸收带宽覆盖整个 X 波段, 其电磁波性能比较如图 2 所示<sup>[23]</sup>。该复合材料通过引入大量相界面及缺陷来增强极化强度, 从而进一步衰减入射电磁波。而为了改善在 VO<sub>2</sub> 在相变前损耗能力弱的问题, Ma 等<sup>[24]</sup> 构建了一种核壳结构, 采用介电-导电复合损耗的设计, 引入亚波长大小的还原氧化石墨烯微球(RGOm)具有高电导率, 可以增强复合材料的导电损耗, 在复合材料中作为传导损耗单元。而高电导率带来表面高反射, 需要与介电材料进行平衡, 以保证阻抗匹配, 因此又设计核壳结构 VO<sub>2</sub>@PDA(聚多巴胺)粉末作为介电-导电复合设计中的介电材料, 提供介电损耗能力。该材料在多种损耗模式并行下, 实现了 -41 dB 的最小反射损耗, 有效吸收带宽最大 2.16 GHz。基于 VO<sub>2</sub> 的温度相变特性, 该复合材料有效吸收带宽与最小反射损耗的最大变化量分别约为 1.5 GHz 和 24 dB, 实现了可调频的雷达隐身特性。

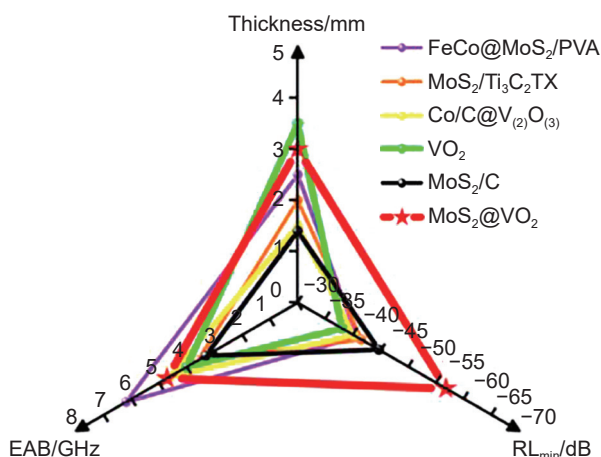


图2 MoS<sub>2</sub>@VO<sub>2</sub> 电磁波吸收性能比较图<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Comparison chart of MoS<sub>2</sub>@VO<sub>2</sub> electromagnetic wave absorption performance<sup>[23]</sup>

除了构建核壳结构外, 纳米线结构在提升吸波性能方面也较为突出。Ji 等<sup>[25]</sup> 利用新型水热法合成 VO<sub>2</sub> 纳米线, 为纳米线结构在 VO<sub>2</sub> 隐身领域应用提供制备方法。随后, Liang 等<sup>[19]</sup> 制备纳米线 VO<sub>2</sub>/PVDF-HFP(聚偏二氟乙烯-六氟丙烯共聚物), 通过调整不同 VO<sub>2</sub> 纳米线的含量, 实现两种不同的开关模式, 这种一维纳米线结构表现出各向异性和高纵横比, 易交联成导电网络, 最终实现最大有效吸收带宽为 4.85 GHz, 最小反射损耗为 -53.09 dB。

此外, 多孔结构也是微观形貌调控中极具价值的设计方案。在雷达隐身材料设计中, “轻” 是衡量材料实用性的核心指标, 构建 VO<sub>2</sub> 气凝胶结构旨在达成 “轻” 的核心指标同时提供良好的电磁损耗能力。气凝胶是一种纳米级多孔网络状固态材料, 具有高孔隙率、低密度以及极大比表面积。高孔隙率为这类基于 VO<sub>2</sub> 的隐身材料带来更多界面极化与电磁波传播路径, 有助于增强隐身性能。同时多孔结构能有效提高阻抗匹配<sup>[26]</sup>。Wang 等<sup>[27]</sup> 合成具有动态频率的可调、可切换吸收开关的 CNTs(碳纳米管)/VO<sub>2</sub>/ANF(芳纶纳米纤维)复合气凝胶, 引入的碳纳米管结合气凝胶的多孔结构优化了阻抗匹配, 同时有利于形成导电网络来增强导电损耗。基于 VO<sub>2</sub> 相变特性, 其最大吸收频率在 X 波段从 12.24 GHz 到 8.56 GHz 调制, 最大有效吸收带宽为 3.70 GHz。VO<sub>2</sub> 相变前电导率较低, 通过多组分设计引入高导电材料可以提升其相变前的电磁损耗能力, 结合上述结构调控设计, Cheng 等<sup>[28]</sup> 通过引入还原氧化石墨烯(RGO)高导电材料, 合成了具有开关功能的 RGO/VO<sub>2</sub> 复合气凝胶, 对开关功能的循环稳定性作了验证, 最大有效吸收带宽可高达 7.27 GHz, 最小反射损耗为 -49 dB。与此同时, 一些 VO<sub>2</sub> 基隐身材料存在获取难度大、原料成本高等问题, 制约大规模生产。同时部分合成路径还会带来有毒副产物, 引发环境污染问题。生物质衍生的多孔结构在解决上述问题的同时, 其异质界面还能一定程度上提升电磁波损耗能力<sup>[29-31]</sup>。Mao 等<sup>[32]</sup> 合成了 VO<sub>2</sub> 包覆的板栗针生物质衍生多孔碳(BPC)的异质结构, 其 BPC 来源于生物质废弃物, 具有低成本、轻污染、低密度的特点。VO<sub>2</sub>/BPC 复合材料表现出具有大量孔隙的特殊阵列结构, 增强了电磁波的多重散射与反射。此外, 较高的表面积为电荷转移提供了更多的路径, 增强了电磁波的耗散作用。同时, 加入的 VO<sub>2</sub> 分布于 BPC 基体中, 大幅增强界面极化, 导致更多的极化损耗。最终, VO<sub>2</sub>/BPC 复合材料在 2.5 GHz 的宽有

效吸收带宽下实现了 $-54$  dB的最小反射损耗。

另外,单一 $\text{VO}_2$ 存在阻抗匹配差的问题,这会导致大量电磁波被反射,无法进入材料内部损耗,极大影响雷达隐身性能。梯度或层级结构则为解决这一问题提供了有效方案。Chen等<sup>[33]</sup>采用水热法制备具有多级花瓣状层合结构的 $\text{VO}_2(\text{D})$ 前驱体,随后通过后续退火获得与 $\text{VO}_2(\text{D})$ 样品形貌保持相似形状和几何图案的多级花瓣状层状结构 $\text{VO}_2(\text{M})$ ,同时还为调控微观形貌引入退火工艺。通过不同退火温度中电磁参数的对比,最终得到了 $570^\circ\text{C}$ 下退火样品在 $3.5$  mm厚度下最小反射损耗为 $-37.99$  dB,而在 $1.3$  mm厚度下有效吸收带宽达到 $4.01$  GHz,获得较为优异的电磁波吸收性能。同样, $\text{VO}_2$ 通过结合MXene材料,可充分利用MXene提供的二维层状结构优势。Pan等<sup>[34]</sup>结合高温热处理制备出 $62^\circ\text{C}$ 下具有金属-绝缘体可逆转变的MXene/ $\text{VO}_2$ 异质结构,MXene表面丰富的官能团与缺陷增强界面极化,层状结构促进导电网络的形成,增强电导损耗,在 $70^\circ\text{C}$ 时有效吸收带宽可达 $4.04$  GHz。

在隐身材料设计中,多组分协同策略是提升性能的重要途径。上述研究均围绕介电-电导损耗机制展开,而通过加入磁性金属元素引入磁损耗机制,可进一步拓展损耗方式,显著提升电磁波损耗能力。在此基础上,若能结合上述微观形貌调控策略,可实现介电-磁损耗协同耦合。Chen等<sup>[20]</sup>制备具有不同形态的 $\text{Cu}_9\text{S}_5@/\text{VO}_2$ 微球,其中 $\text{VO}_2$ 设计

为空心结构,如图3(a)所示,在减轻质量的同时有助于入射电磁波的多界面反射。由于空心球形的 $\text{VO}_2$ 结构,使得 $\text{Cu}_9\text{S}_5$ 通过静电自组装逐渐在 $\text{VO}_2$ 晶体表面生长(图3(b)),两者界面处构建的异质结构引入强烈的界面极化,从而增强电磁波的衰减。复合材料得益于引入的磁损耗机制和层状花形结构设计,多种损耗机制协同作用下,最终使其最小反射损耗达到 $56.98$  dB,在 $2.5$  mm厚度下,有效吸收带宽达到了 $6.86$  GHz。与其他微波吸收材料相比, $\text{Cu}_9\text{S}_5@/\text{VO}_2$ 展示出优异的电磁波吸收性能,尤其是宽频段性能,如图3(c)所示。通过软件模拟雷达散射面积降低了 $16.56$  dBm<sup>2</sup>,具有较为优异的雷达隐身性能。

除了结构调控策略外,基于 $\text{VO}_2$ 的雷达隐身材料常使用掺杂改性对其相变温度进行调控。常规的基于 $\text{VO}_2$ 的可调隐身材料在相变温度点会发生电磁性能突变,虽可实现开关式切换,但无法实现梯度性变化,进而对相变前后隐身性能的平稳过渡产生不利影响。为解决这一问题,潘志浩<sup>[35]</sup>通过掺杂法制备了不同相变温度的 $\text{VO}_2$ 纳米颗粒, $55^\circ\text{C}$ 的钨元素掺杂二氧化钒( $\text{W-VO}_2$ )填料含量为 $40\%$ (质量分数,下同), $68^\circ\text{C}$ 的 $\text{VO}_2$ 填料含量为 $20\%$ ,RGO微球填料含量为 $0.5\%$ 时,不同相变温度的 $\text{VO}_2/\text{RGO}/\text{EP}$ 复合材料实现了在升温过程中吸波频段的多档调节。在 $100^\circ\text{C}$ 下,其最小反射损耗可达 $-74$  dB,不同温度下有效吸收带宽均在 $3$  GHz以上,且不同温度下吸收频点随温度变化,

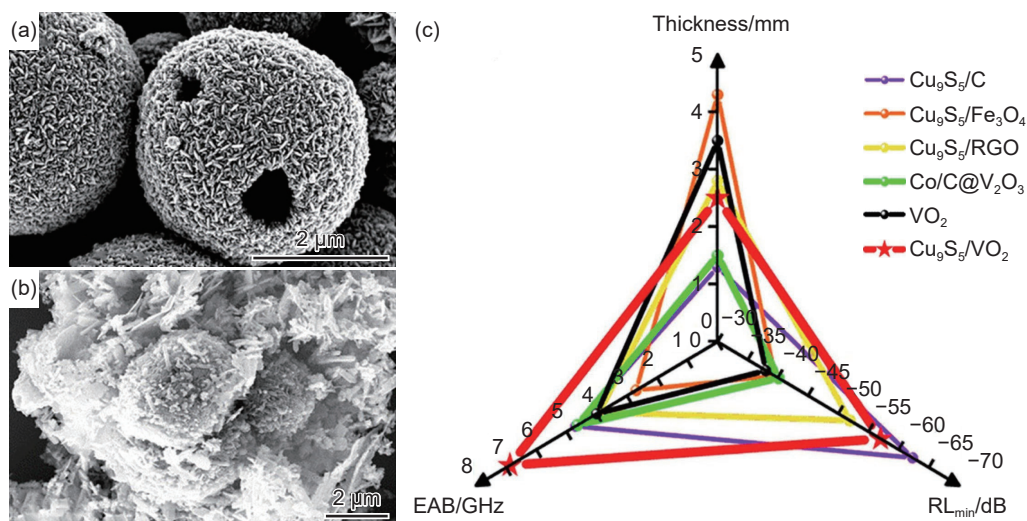


图3  $\text{Cu}_9\text{S}_5@/\text{VO}_2$  复合吸波材料形貌演变与电磁波吸收性能<sup>[20]</sup> (a)空心 $\text{VO}_2$ 球;(b)120 mg $\text{VO}_2$ 下的层状花球 $\text{Cu}_9\text{S}_5@/\text{VO}_2$ 微球;(c)电磁波吸收性能比较

Fig. 3 Morphological evolution and electromagnetic wave absorption performance of  $\text{Cu}_9\text{S}_5@/\text{VO}_2$  composite materials<sup>[20]</sup> (a) hollow  $\text{VO}_2$  spheres; (b) layered flower-like  $\text{Cu}_9\text{S}_5@/\text{VO}_2$  microspheres under 120 mg  $\text{VO}_2$ ; (c) comparison of electromagnetic wave absorption performance

在 12.72~10.48 GHz 范围内变化, 该材料实现了复合材料多频段吸波性能的梯度调控。本文将基于 VO<sub>2</sub> 的雷达隐身材料性能参数汇总, 列于表 1<sup>[19-20,23-24,27-28,32-37]</sup>, 以便对比研究。

综上所述, 结合表 1 可以看出 VO<sub>2</sub> 基雷达隐身材料大部分具有复杂结构特征, 而 VO<sub>2</sub> 的特质决定经过相变温度后电导率会发生突变, 从而导致 VO<sub>2</sub> 实现雷达隐身主要依靠电损耗, 损耗模式单一。目前研究主要是通过多组分设计加入高导电材料来增强 VO<sub>2</sub> 相变前的介电损耗能力, 比如 RGO 微球<sup>[23,35]</sup>, 提高宽温域适应性。随后通过结构调控设计来构建复杂结构延长电磁波传播路径, 增加入射电磁波散射与反射, 提高导电损耗。引入复杂结构同时也引入大量缺陷、异质界面等, 进一步增强介电损耗, 形成介电-导电损耗复合损耗机制。复杂结构包括核壳结构<sup>[23-24]</sup>、复合气凝胶<sup>[27-28,37]</sup>、一维纳米线结构<sup>[19,25]</sup>、异质结构<sup>[20,32]</sup>等, 均具有高孔隙率、高比表面积, 这些特性是基于 VO<sub>2</sub> 的雷达隐身材料形貌特征的构建重点, 能有效增强电磁波损耗能力同时利于其他材料的引入与掺杂改性。目前基于 VO<sub>2</sub> 的雷达隐身材料中, 鲜有引入磁性金属的案例。如果引入磁损耗机制, 与电导-介电损耗机制并行, 可使材料具有更强的电磁损耗能力<sup>[20]</sup>, 这或许是未来基于 VO<sub>2</sub> 材料获得更为强大隐身能力的一种有效途径。

## 2.2 基于 VO<sub>2</sub> 的红外隐身材料

红外探测手段利用被探测物体的温度与环境

温度之间差异来侦测与识别目标。一般来说, 大多数武器装备在使用过程中都会产生热量, 故利用热量差异来侦测目标在多个平台、不同作战环境均具有良好的适用性<sup>[38]</sup>。目前红外主动夜视、热成像等红外探测与红外制导导弹等武器装备已经得到广泛应用。为降低武器装备在面对红外探测技术时的可见性, 提升武器装备的生存性能, 红外隐身材料正越来越受到重视<sup>[39]</sup>。红外隐身材料主要通过调控物体本身的红外辐射特性来达成隐身, 而红外辐射特性由物体绝对温度和红外发射率构成<sup>[40]</sup>。在通常的红外隐身材料中, 会使用低红外发射率材料、隔热材料(减少物体辐射能量)、热障涂层(降低物体表面温度)、相变材料(动态红外隐身)来达到红外隐身的效果。

VO<sub>2</sub> 属于典型的温度相变材料, 其相变特性除了电导率存在变化外, 关键红外隐身指标即红外发射率也会发生显著变化。这是因为红外发射率遵循哈根-鲁本斯关系<sup>[41]</sup>, VO<sub>2</sub> 材料相变后电导率升高<sup>[5]</sup>, 表面红外发射率降低。而红外发射率是描述不同物体发射红外辐射的能力, 其数值在 0~1 之间波动, 数值越大, 其红外辐射能力越强。

由图 4<sup>[42]</sup> 得到 VO<sub>2</sub> 材料的红外发射率随着温度升高而发生改变, 在相变温度下 (< 68 °C) 具有较高的红外发射率, 对红外波处于高透射状态; 而在相变温度以上 (> 68 °C) 处于金属态, 具有较低的红外发射率, 对于红外波处于高反射状态<sup>[42]</sup>。

红外光根据波长分为 3 部分, 分别为近红外

表 1 基于 VO<sub>2</sub> 的雷达隐身材料主要参数  
Table 1 Main parameters of radar stealth materials based on VO<sub>2</sub>

Absorbent	Microstructure	RL <sub>min</sub> /dB	EAB/GHz	Modulation range
VO <sub>2</sub> /RGO/EP <sup>[35]</sup>		-71.00	>3.00	2.24 GHz
VO <sub>2</sub> /PVDF-HFP <sup>[19]</sup>	1D nanowires structure	-53.09	4.85	Switching characteristics
VO <sub>2</sub> (M) <sup>[33]</sup>	Petaloid lamination structure	-37.99	4.01	
VO <sub>2</sub> /EPC <sup>[32]</sup>	Heterostructure	-54.00	2.50	
MXene/VO <sub>2</sub> <sup>[34]</sup>	Heterostructure		4.04	
MoS <sub>2</sub> @VO <sub>2</sub> <sup>[23]</sup>	Core-shell structure	-56.78	4.00	
VO <sub>2</sub> @PDA/RGOM <sup>[24]</sup>	Core-shell structure	-24.00	1.50	1.5 GHz
VO <sub>2</sub> /EPM <sup>[36]</sup>	Microsphere composites foam		3.25	Switching characteristics
VO <sub>2</sub> /carbon aerogel <sup>[37]</sup>	Aerogel	-52.00	5.20	
CNTs/VO <sub>2</sub> /ANF <sup>[27]</sup>	Aerogel		3.70	Switching characteristics
RGO/VO <sub>2</sub> <sup>[28]</sup>	Aerogel	-49.00	7.27	Switching characteristics
Cu <sub>9</sub> S <sub>5</sub> @VO <sub>2</sub> <sup>[20]</sup>	Lamellar-flower structure	-56.98	6.86	/

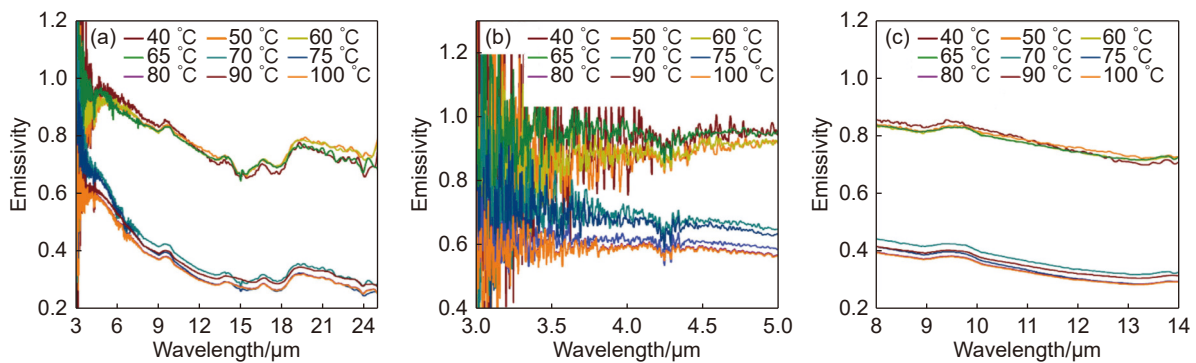


图4 VO<sub>2</sub> 纳米粉末颗粒在40~100 °C 范围内红外发射率曲线<sup>[42]</sup> (a)全波段(2.5~25 μm); (b)中红外波段(3~5 μm); (c)远红外波段(8~14 μm)

Fig. 4 Infrared emissivity curves for VO<sub>2</sub> nanopowder pellets at temperatures ranging from 40-100 °C<sup>[42]</sup> (a) full waveband (2.5-25 μm); (b) mid-infrared (3-5 μm); (c) far-infrared (8-14 μm)

(0.75~3.00 μm)、中红外(3~25 μm)和远红外(25~1000 μm)<sup>[43]</sup>。而VO<sub>2</sub>在2.5 μm近红外波段的其透过率变化量达到50%以上,而在中远红外波段红外发射率变化量可达60%<sup>[44]</sup>。故该类材料在红外自适应隐身、节能玻璃、智能热控等全红外波段均具有较大发展潜力并得到广泛的应用<sup>[45]</sup>。由此,本文将从掺杂改性、结构调控设计、多组分设计3方面展开介绍。

对于基于VO<sub>2</sub>的红外隐身材料,较高的相变温度是限制其应用的重要问题,通常利用掺杂金属元素对其相变温度进行调控,同时利用金属层的低红外发射率进一步提升红外隐身性能。Li等<sup>[46]</sup>制备了一种Ta掺杂的VO<sub>2</sub>薄膜,其在4%(原子分数,下同)Ta浓度下相变温度为24.8 °C,能实现室温下的相变特性。Zhang等<sup>[47]</sup>用水热重结晶法制备钨(W)掺杂VO<sub>2</sub>(M),掺杂0.7% W的VO<sub>2</sub>(M)制成的薄膜其相变温度为42.7 °C,其透光率为61.7%,太阳能调制为11.7%,该薄膜在近红外波段有较大应用前景。Kim等<sup>[48]</sup>报道了一种能够在接近室温下隐藏热源物体的被动伪装薄膜,由具有梯度W浓度的二氧化钒(VO<sub>2</sub>)层构成,其中W元素掺杂可以有效调整VO<sub>2</sub>的相变温度更接近室温。通过引入梯度浓度的W,使得材料展现出更为平缓的发射率过渡特性,显著增强红外隐身性能。Wang等<sup>[49]</sup>提出一种VO<sub>2</sub>/Al复合材料,含50%的VO<sub>2</sub>,在30 °C时实现了0.54的低发射率,而在100 °C时降至0.43,同时使用红外相机检测其表面温度仅为53.4 °C。相比于单个金属离子掺杂,共掺杂显著增强了相变温度的调控效果。Li等<sup>[50]</sup>报道了一种溶剂-凝胶法结合后退火合成W/Al共掺杂VO<sub>2</sub>粉末,利用金属离子掺杂将相变温度降低至43.8 °C,红外发射率从室温的0.99降低至90 °C下的0.51,

变化范围较大。此外,针对VO<sub>2</sub>基材料普遍存在的抗氧化性较差的问题。Al的掺杂会在表面产生Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,有效增强材料的环境稳定性与耐腐蚀性,对该材料的实际应用具有较大意义。

金属离子的掺杂虽能有效降低相变温度,提高泛用性,但会影响红外发射率的调节范围,为此,Chen等<sup>[51]</sup>开发出一种由Mo掺杂的VO<sub>2</sub>红外隐身材料。转变前后红外发射率的变化范围提高了153%。更进一步优化了VO<sub>2</sub>掺杂改性相关研究。但是,过量Mo<sup>6+</sup>杂质(≥14%)会提高相变温度<sup>[52]</sup>,导致材料在常温下红外隐身性能失效。因此,被报道的大部分案例均为关于VO<sub>2</sub>红外隐身材料掺杂金属元素的研究,不同金属元素掺杂均会降低VO<sub>2</sub>的相变温度,并对太阳光透射率、红外透射率等性能参数产生影响。在实际应用中,应考虑材料的应用重点以期达到相变温度与红外隐身性能的平衡。

近年来,通过结构调控设计提升VO<sub>2</sub>基红外隐身性能的方法众多。通过微纳结构设计中纳米颗粒的尺寸效应能增加红外波的多次反射和散射路径,来提升红外隐身性能。相比于薄膜,纳米粉末更适合与复杂表面的结合。Ji等<sup>[53]</sup>利用苹果酸辅助水热法合成VO<sub>2</sub>纳米粉末,这种纳米粉末具有良好的热稳定性,通过相变来控制辐射强度和降低其辐射温度。同样地,Li等<sup>[17]</sup>报道了一种利用溶剂-凝胶法结合后退火工艺制备可控尺寸的VO<sub>2</sub>(M)纳米颗粒,其具有优异的热致变色性能与红外隐身性能。这些都为VO<sub>2</sub>材料在纳米尺度下的制备提供了基础方法。

对于VO<sub>2</sub>易氧化、抗腐蚀性差的问题,核壳结构可以利用较为稳定的化合物作为壳层,有效提升材料整体的稳定性。Li等<sup>[54]</sup>采用溶剂热法合成核壳结构VO<sub>2</sub>(M)@SnO<sub>2</sub>纳米颗粒,利用SnO<sub>2</sub>涂层

包覆来增加材料稳定性。同样的, Li 等<sup>[55]</sup> 制备基于核壳 W-VO<sub>2</sub>@CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒的红外隐身与超疏水薄膜, 基于 VO<sub>2</sub> 相变特性使最大红外发射率变化范围达到了 0.41, 利用 CeO<sub>2</sub> 包覆与其超疏水性能提升材料环境适应性与稳定性, 有效避免 VO<sub>2</sub> 氧化失效, 水接触角最高为 156°。此外, 研究表明在不同 pH 值与温度下依旧表现出超疏水性, 显著增强材料的耐腐蚀性能。其红外隐身与超疏水耦合机制如图 5 所示。

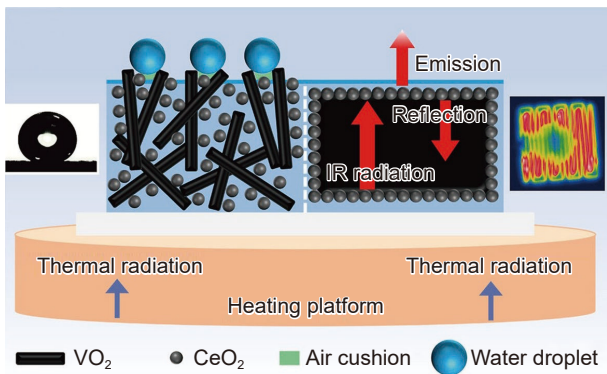


图 5 W-VO<sub>2</sub>@CeO<sub>2</sub> 基薄膜红外隐身和超疏水耦合机制示意图<sup>[55]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the infrared stealth and superhydrophobic coupling mechanism for W-VO<sub>2</sub>@CeO<sub>2</sub> based film<sup>[55]</sup>

Ji 等<sup>[18]</sup> 制备一种 VO<sub>2</sub>/ZnS 核壳结构, 能够提升抗氧化性, 防止 VO<sub>2</sub> 氧化为 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 造成相变性能下降。ZnS 壳层改变了 VO<sub>2</sub> 纳米颗粒的颜色, 使颜色趋近于可见光伪装的灰绿色, 与 VO<sub>2</sub> 所提供的红外伪装相结合, 达成了用于红外/可见光多频段隐身材料。因 VO<sub>2</sub> 的相变特性, 该材料实现红外发射率变化值达 0.28, 其变化曲线见图 6。

除了核壳结构外, 纳米棒状的 VO<sub>2</sub> 可以提供优

异的动态发射率调节, Gao 等<sup>[56]</sup> 制备了一种基于 VO<sub>2</sub> 纳米棒的动态红外辐射调节材料, 其发射率变化高达 0.46。常规的 VO<sub>2</sub> 基红外隐身材料其红外发射率随温度增高而降低, 而在航天智能热控这一领域, 要求随温度升高而红外发射率提高, 向外部尽可能多地辐射热量, 以保护内部元器件正常工作。针对这一问题, Wu 等<sup>[44]</sup> 采用两步溶剂热法制备 CaF<sub>2</sub>@VO<sub>2</sub> 核壳结构微球, 通过改变黏结剂的种类、VO<sub>2</sub> 壳层的厚度、填料体积分数和涂层厚度, 可实现对涂层高低温下红外发射率的调控。其核壳粒子中壳层的质量比为 0.12, 填料体积分数为 6%, 涂层厚度为 30 μm 左右时, 涂层的平均红外发射率从 30 °C 时的 0.47 增加到 90 °C 时的 0.83, 发射率的变化值为 0.36, 实现了红外发射率随温度增高而增加的特性, 拓宽了 VO<sub>2</sub> 基材料的应用场景。

另外, 通过多组分设计在 VO<sub>2</sub> 基红外隐身材料中引入吸热材料, 旨在将降低温度与低红外发射率双结合, 最大程度提升红外隐身性能。Li 等<sup>[57]</sup> 利用静电纺丝法制备以聚丙烯腈为基体的二氧化钒/聚乙二醇/聚丙烯腈 (VO<sub>2</sub>/PEG/PAN) 复合纳米纤维薄膜, 聚乙二醇在固液相变过程中会吸收大量热量, 有效控制物体的表面温度, 并与 VO<sub>2</sub> 红外发射率相变特性结合, 达成良好的热调节性与可调的红外发射率。同时聚乙二醇的化学稳定性较好, 耐酸碱、抗氧化, 可以有效补偿 VO<sub>2</sub> 易氧化的特性, 实现 40%VO<sub>2</sub> 在 90 °C 下红外发射率为 0.16, 为红外隐身领域提供了设计思路。在 VO<sub>2</sub> 基础上再引入掺杂半导体, 实现静态红外发射与 VO<sub>2</sub> 动态调控相结合, 实现宽温带的红外隐身动态响应材料。Fang 等<sup>[58]</sup> 以聚丙烯腈为基体, 制备 ATO/PAN-xVO<sub>2</sub> 纤维膜复合材料, 结合掺铋氧化锡 (ATO) 的热敏电阻特性, 随着温度升高, 使其电导率激增, 红

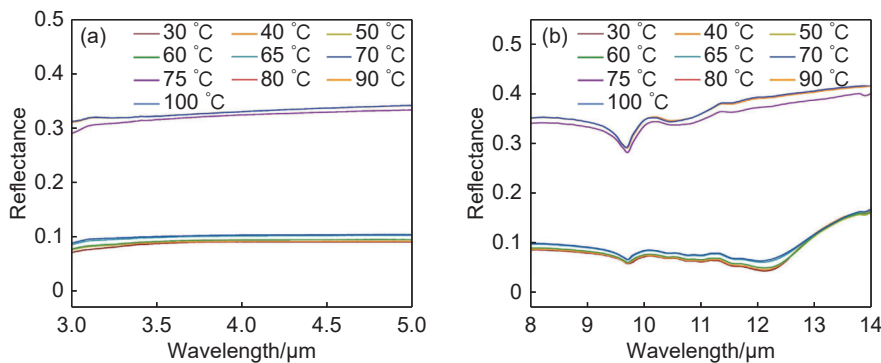


图 6 VO<sub>2</sub>/ZnS 核壳纳米粉末颗粒在 30~100 °C 温度范围内的红外反射率曲线<sup>[18]</sup> (a) 中波红外范围 (3~5 μm); (b) 长波红外范围 (8~14 μm)

Fig. 6 Infrared reflectance curve of VO<sub>2</sub>/ZnS core-shell nanopowder pellets at temperatures ranging from 30 to 100 °C<sup>[18]</sup> (a) mid-wave infrared range (3-5 μm); (b) long-wave infrared range (8-14 μm)

外发射率随之降低,再结合  $\text{VO}_2$  的温度相变特性,使复合材料红外发射率在  $90\text{ }^\circ\text{C}$  时降为 0.51。同时以上材料基于高分子聚合物的基体设计,提高稳定性的同时使整体具有良好的力学特征与柔韧性。

综上所述,目前利用  $\text{VO}_2$  特性构建红外隐身材料方法主要为通过掺杂改性(例如钨掺杂)降低相变温度<sup>[46,51]</sup>,提高温度适应性。通过结构设计调控隐身性能与稳定性,比如微纳结构<sup>[17,56]</sup>、核壳结构<sup>[18,44,55]</sup>。通过多组分设计<sup>[57-58]</sup>将低表面温度与低红外发射率相结合,扩宽红外隐身机制,提升红外隐身性能。

因此,基于  $\text{VO}_2$  的隐身材料在雷达波段与红外波段都有着众多应用实例,结合其在双波段的相变特性,使其制成雷达/红外双波段智能化隐身材料成为可能。这种材料具有传统隐身材料不具备的多频段适应性。已有研究表明, $\text{VO}_2$  结合气凝胶的轻质与多孔架构能达成较为优异的电磁波吸收性能<sup>[27-28]</sup>,且气凝胶自身具有出色的隔热性与红外隐身性能<sup>[59]</sup>,配合  $\text{VO}_2$  的红外相变特性进一步提升红外隐身性能。Chen 等<sup>[37]</sup>利用壳聚糖衍生的碳气凝胶作为骨架,基于  $\text{VO}_2$  的相变材料合成一种复合多孔的气凝胶,该材料在表现出优异雷达隐身性能的同时,兼顾红外隐身,应用前景广阔。

作为骨架的碳气凝胶,在  $\text{VO}_2$  相变前后均优化了阻抗匹配,且多孔结构提供大量的电磁波传播路径,进一步强化介电损耗能力。Chen 等<sup>[37]</sup>引入的高温退火工艺使得晶粒更加聚集,其形成的界面处有助于提升电磁损耗能力。由图 7<sup>[37]</sup>中  $\text{VO}_2$  和  $\text{VO}_2/\text{CA}$ (壳聚糖)的反射损耗曲线可知,相比于原本  $\text{VO}_2$ ,通过结构调控设计在  $\text{VO}_2$  中引入碳气凝胶骨架,强化了电磁波吸收能力。对于红外隐身性能,得益于其中的  $\text{VO}_2$  相变特性,红外发射率随温度升高而降低,且气凝胶所特有的多孔结构提供良好隔热性。两者协同作用使得材料红外隐身性能得以进

一步提升。最终,通过偶极极化、界面极化、缺陷促成偶极诱导极化、电导损失等多种损耗机制协同作用。该复合材料在 2.4 mm 厚度下可以达到  $-52\text{ dB}$  的最小反射损耗,在 1.6 mm 处的有效吸收带宽达到 5.2 GHz。同时,在热隐身性能方面,底部加热至  $120\text{ }^\circ\text{C}$  后保温 180 s,其样品的表面温度仅为  $2.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,表现出优异的隔热性能,为雷达/红外双波段隐身材料提供了可行的解决方案。

虽然  $\text{VO}_2$  的热致相变特性在雷达与红外隐身领域均具有一定的优势,但目前基于  $\text{VO}_2$  雷达与红外兼容隐身材料应用较少,主要有以下几点困难:首先是多频谱需求的矛盾<sup>[60]</sup>:雷达隐身领域需要低反射,高吸收,使得更多雷达波进入吸波体内,而红外隐身则需要低发射率、高反射率以减少热辐射,其相变特性难以满足雷达与红外兼容隐身的矛盾需求。 $\text{VO}_2$  在相变前低介电常数,缺乏损耗电磁波能力。在相变后,电导率激增,可能导致的阻抗不匹配,从而影响吸波性能。且相变过程缺乏梯度性变化<sup>[10]</sup>,难以实现隐身性能的平稳过渡。两者均需要通过多组分设计、结构调控设计等策略进一步解决。其次是响应速度与稳定性: $\text{VO}_2$  相变为热致相变,热激励响应速度慢<sup>[45]</sup>,难以应对复杂环境下载体的实时隐身需求,且多次相变循环后可能会导致隐身性能下降。 $\text{VO}_2$  在雷达隐身领域多应用聚焦于实现电磁吸收/屏蔽的开关功能<sup>[19,27-28,36]</sup>,在红外波段  $\text{VO}_2$  展现出自适应红外隐身的巨大潜力<sup>[44,56,58]</sup>。这可能是由于电导率突变导致电磁波吸收能力不佳且无法实现调频特性,从而限制雷达/红外兼容隐身领域的应用。已有研究证明,通过多组分设计加入不同相变温度的  $\text{VO}_2$ <sup>[35]</sup>,或利用其他损耗材料弥补相变前后损耗能力差异<sup>[24]</sup>,可实现开关特性向频段可调、自适应的转变。将这两种设计策略与红外自适应隐身相结合,可构建一种基于  $\text{VO}_2$  材料自适应特性的新型雷达-红外兼容隐身方案。

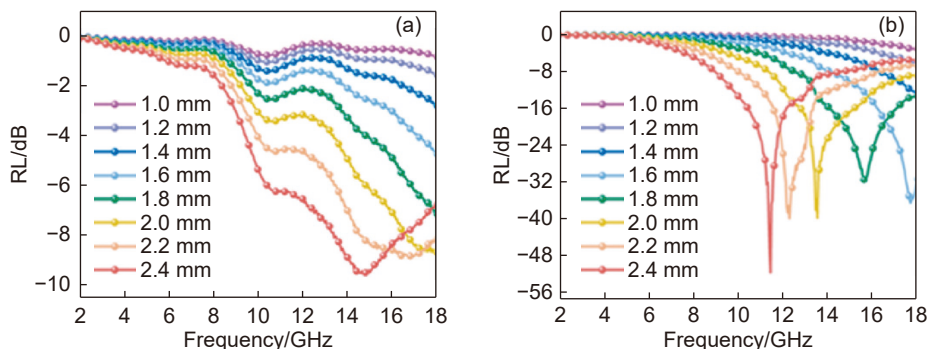


图 7 厚度为 1.0~2.4 mm 时材料的反射损耗值<sup>[37]</sup> (a)  $\text{VO}_2$ ; (b)  $\text{VO}_2/\text{CA}$ (壳聚糖)

Fig. 7 Reflection loss values at a thickness of 1.0-2.4 mm<sup>[37]</sup> (a)  $\text{VO}_2$ ; (b)  $\text{VO}_2/\text{CA}$ (chitosan)

### 3 基于 $V_2O_3$ 和 $V_2O_5$ 的雷达隐身材料

在钒基氧化物体系中,  $V_2O_3$  与  $V_2O_5$  作为两种重要的氧化物, 近年来因其独特的电磁特性在雷达隐身材料领域已有众多应用。与前文所提到的  $VO_2$  相比,  $V_2O_3$  同样具有相变特性, 但其相变温度极低, 一般为  $-123.15\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[61]</sup>, 较难实现实际应用。在相变温度以上  $V_2O_3$  表现为电阻较低的金属态<sup>[62]</sup>, 具有高电导率, 常作为介电损耗型雷达隐身材料。而  $V_2O_5$  具有物质储量丰富、成本低、晶体结构稳定等特点<sup>[63]</sup>, 同时  $V_2O_5$  独特的层状晶体结构, 不仅为锂离子插层与脱层提供更多空间<sup>[64]</sup>, 使其在电化学储能领域具有重要应用价值, 也为  $V_2O_5$  实现优异的雷达隐身性能提供了结构基础, 展现出在雷达隐身材料领域的应用潜力。为此, 本文将分别介绍基于  $V_2O_3$  与  $V_2O_5$  的雷达隐身材料。

#### 3.1 基于 $V_2O_3$ 的雷达隐身材料

$V_2O_3$  作为钒基氧化物中  $V^{3+}$  的稳定存在形式, 具有刚玉型六方晶体结构, 钒离子占据八面体间隙, 氧离子形成密堆积框架。作为一种典型热致相变材料,  $V_2O_3$  在相变温度 ( $-123.15\text{ }^\circ\text{C}$ ) 时发生晶格畸变, 经历从低温反铁磁绝缘相到高温顺磁性金属相的金属-绝缘体转变, 晶体结构也从绝缘相的单斜晶系变为金属相的菱面体对称<sup>[61]</sup>。常温下  $V_2O_3$  为金属性导体, 具有高电导率与强介电损耗, 属于强电子关联体系的典型模型材料, 展现出雷达隐身领域的应用潜力。由于  $V_2O_3$  相变温度在  $-123.15\text{ }^\circ\text{C}$ , 常温下无需考虑相变前后电导率变化对雷达隐身性能的影响, 但也存在着阻抗匹配差、抗氧化性弱、缺少磁损耗机制等性能缺陷, 目前主要利用多组分设计与结构调控并行解决。

对于  $V_2O_3$  红外隐身方面, 在红外波段下,  $V_2O_3$  具有显著的光导率响应<sup>[8,61]</sup>, 且随着能量变化, 出现上下波动, 表明其出现能带间跃迁行为, 这一行为可能导致电子吸收红外光子能量, 从而导致高红外发射率。而且以电子主导的红外吸收能力难以通过结构调控等手段弱化, 因此极大限制了这种材料在红外隐身方面的应用。鉴于此, 本文将仅介绍雷达隐身领域的应用。下面将从结构调控方法、多组分设计、掺杂改性 3 个方面来分别介绍基于  $V_2O_3$  的雷达隐身材料。

近年来,  $V_2O_3$  基雷达隐身材料常使用核壳结构设计策略来规避  $V_2O_3$  固有缺陷, 其中功能性壳层的引入被证明可有效提升材料稳定性与优化阻抗匹配, Cheng 等<sup>[65]</sup> 合成一种由碳纳米膜稳定的

$V_2O_3$  纳米棒 ( $V_2O_3@C$  核壳结构), 将碳纳米膜涂覆在其壳层, 可以为材料提供缺陷来增强极化损耗, 同时优化阻抗匹配以及提高稳定性, 其主要吸收机制为电导损耗以及多重极化弛豫。最终材料有效吸收带宽在  $1.7\text{ mm}$  处达到  $7.21\text{ GHz}$ , 最大吸收达到  $-56\text{ dB}$ 。在单层核壳结构的基础上, 为进一步提升  $V_2O_3$  基材料的介电损耗能力, Zhao 等<sup>[66]</sup> 制备双层核壳结构自组装的  $V_2O_3$  微球由纳米颗粒组成。微球之间的葡萄状交织促进多层反射作用, 且双层结构具有较大比表面积, 提供更多电荷与缺陷, 增强其极化损耗。两壳层之间的空隙也能为入射电磁波提供更多传导通道, 进一步强化电导损耗。同时空隙造成密度低, 有利于轻量化设计。通过上述极化损耗、电导损耗以及多重反射损耗的协同效应, 使得在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  下热处理后, 最小反射损耗达到  $-67.12\text{ dB}$ , 厚度在  $2.2\text{ mm}$  下, 有效吸收带宽为  $5.49\text{ GHz}$ 。该材料具有较为优异的吸波能力, 为雷达隐身材料的新的结构形貌设计提供了思路。

据报道, 含钒金属有机框架 (V-MOF) 衍生的  $V_2O_3$  复合材料表现出比一般氧化物 (如  $TiO_2$ 、 $Co_3O_4$  和  $Fe_2O_3$ ) 更强的介电损耗<sup>[67]</sup>。生物质衍生的碳材料因其多样性与高空隙率以及独特环境友好性在结构调控设计中占有一席之地, 引入碳衍生结构后带来大量缺陷与高导电性。Zhu 等<sup>[68]</sup> 制备 V-MOF 衍生多孔的  $V_2O_3@C$  纺锤形貌, 其最小反射损耗达  $-19.5\text{ dB}$ , 有效吸收带宽为  $5.2\text{ GHz}$ , 其厚度较薄, 为  $1.7\text{ mm}$ 。Ni 等<sup>[67]</sup> 以蝴蝶翅膀为生物模板, 通过溶热反应与碳化工艺构建了具有轨道状异质结构的  $V_2O_3@C/BWs$  复合材料。得益于蝴蝶翅膀模板固有的多孔结构以及凹腔阵列排布,  $V_2O_3@C/BWs$  衍生碳 (butterfly wings derived carbon, BWC) 复合材料中形成了大量微观异质界面, 从而增强了其界面极化效应, 损耗机制如图 8(a) 所示。最终材料最小反射损耗  $-59.3\text{ dB}$ , 有效吸收带宽  $6.56\text{ GHz}$ , 其 3D 反射损耗如图 8(b) 所示。通过常规方法制备  $V_2O_3$  容易出现团聚现象, 不利于电磁波损耗, 而金属有机框架有助于将  $V_2O_3$  纳米颗粒均匀分散到多孔碳中。利用这一构型, 通过金属元素掺杂引入磁损耗机制, 显著增强  $V_2O_3$  基雷达隐身材料的吸波性能。Zhou 等<sup>[69]</sup> 通过简单的热液、沉淀和热解方法设计合成分层金属有机框架 (MOF) 衍生的  $Co/C@V_2O_3$  空心球体, 其通过空心球体  $V_2O_3$  与多孔  $Co/C$  的合理结合, 使其具有优异的阻抗匹配以及轻量化的特性, 通过介电-磁损耗协同作用, 其最大反射损耗为  $-40.1\text{ dB}$ , 在  $1.5\text{ mm}$

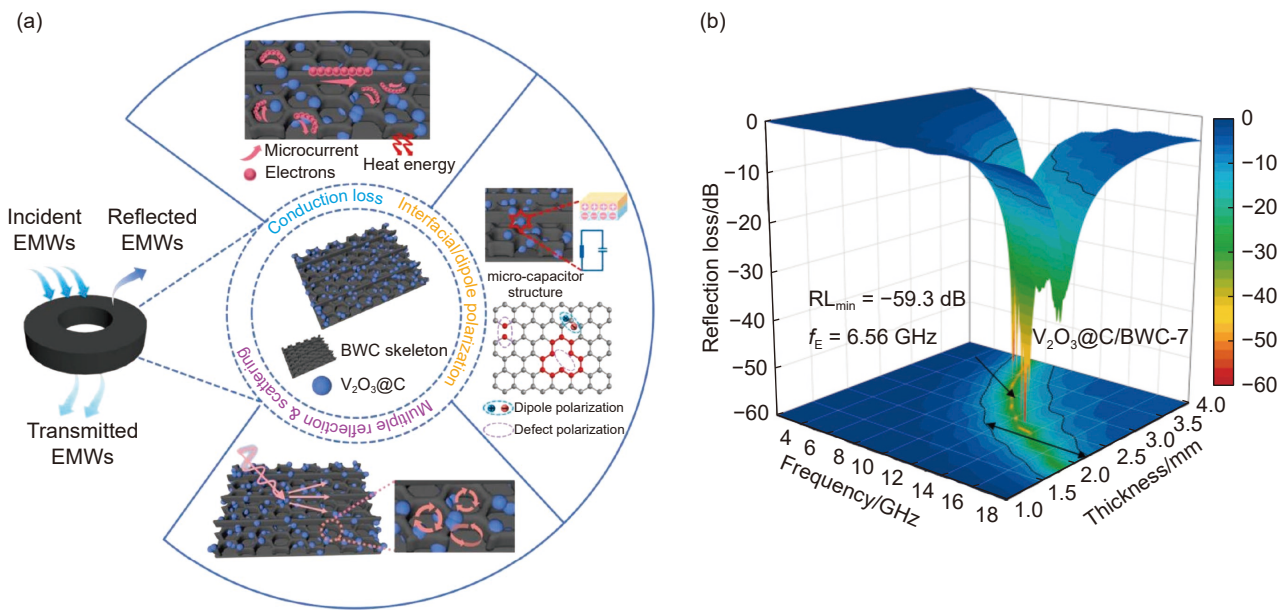


图 8  $V_2O_3@C/BWC$  的微波吸收机制(a)和  $V_2O_3@C/BWC$  的 3D 反射损耗图(b)<sup>[67]</sup>

Fig. 8 Microwave absorption mechanism of  $V_2O_3@C/BWC$  (a) and 3D RL plots of  $V_2O_3@C/BWC$  (b)<sup>[67]</sup>

厚度下有效吸收带宽为 4.64 GHz。

在此基础上,沿用金属有机框架这一构型,引入双金属能更进一步增强  $V_2O_3$  基雷达隐身性能。据报道,MOF 衍生的  $CoNi@C$  纳米结构能够具备较强的磁损耗能力<sup>[70]</sup>。以上述两者为思路,Zhou 等<sup>[71]</sup>以三维花状氧化钒为基体,采用溶剂热法和退火处理制备了  $NiCo@C/V_2O_3$  复合材料。通过磁性材料与介电材料的协同效应,该复合材料在厚度 1.8 mm 时,最小反射损耗可达 -57.40 dB,在 1.6 mm 处最大有效吸收带宽达到 5.36 GHz。

上述基于  $V_2O_3$  的雷达隐身材料通过引入钴基与镍基两种金属元素有效提高了材料的雷达隐身性能,钴基与镍基材料作为一种铁磁材料,其优异的饱和磁化强度与较高的导电性带来了磁损耗与介电损耗结合的损耗特征优势,令其在吸波材料的金属元素掺杂中具有较大发展潜力<sup>[72-73]</sup>。鉴于此,结合核壳结构固有优势,Zhao 等<sup>[74]</sup>制备  $Co/Co_3O_4/Ni$  纳米花为壳、 $V_2O_3$  微球为核,制备分层杨梅状  $V_2O_3@Co/Co_3O_4/Ni$  (VCN-X) 吸收剂,并能通过  $Co/Ni$  含量来控制其形态特性,包括纳米颗粒、纳米片和纳米花。引入的磁性颗粒优化了  $V_2O_3$  的电导率,其磁性与结构特性进一步限制电荷的积累与电子的迁移,从而获得良好的阻抗匹配,结合其丰富的界面极化以及大量缺陷,得到 -59.6 dB 的最小反射损耗与 2.26 mm 下 6.8 GHz 的有效吸收带宽。

除此之外,  $V_2O_3$  基隐身材料通过纳米线结构的高纵横比与高比表面积来进一步强化介电损耗能力,同时纳米线结构为依附或嵌入功能性颗粒提

供理想载体,从而实现多机制雷达隐身性能的提升。Wang 等<sup>[75]</sup>以  $ZnVO$  纳米线为基材,以二乙烯基苯和丙烯腈为负载材料,通过原位聚合和高温煅烧制备负载碳氮的小麦穗形纳米复合材料 ( $V_2O_3/Zn@C$ )。引入  $Zn^{2+}$  并非增加磁损耗,而是增强制备原料  $V_2O_5$  层状结构的稳定性。聚合物碳微球经过高温碳化后渗入纳米线中,形成类似于小麦穗状结构。碳微球的引入保护高温处理下的纳米线结构,并促进快速电子转移,优化阻抗匹配。同时结合结构调控设计所带来的介电损耗增强,在电导损耗与介电损耗共同作用下最终实现最小反射损耗为 -56.5 dB,最大有效吸收带宽为 5.25 GHz。

### 3.2 基于 $V_2O_5$ 的雷达隐身材料

$V_2O_5$  具有典型的层状正交结构,钒离子通过钒氧键形成扭曲的四方锥配位<sup>[8]</sup>。相邻层间通过弱范德瓦耳斯力相互作用,这种层状结构赋予  $V_2O_5$  良好的离子嵌入/脱出能力,赋予其优异的结构可调性。此外,  $V_2O_5$  作为一种具有半导体-金属态相变的热滞材料,相变温度为 257 °C<sup>[76-77]</sup>。常温下,  $V_2O_5$  表现为宽禁带半导体,带隙宽度为 2.35 eV,显著大于  $V_2O_3$  和  $VO_2$  的 0.6 eV<sup>[8]</sup>,这一特性使其室温下导电性较差,导电性弱于其他低价态的钒基氧化物。基于  $V_2O_5$  具有的高价态钒,常温下不易被氧化,表现出较高的化学稳定性。在雷达隐身材料应用方面,目前主要手段是通过多组分设计与结构调控策略相结合,引入高导电性组分构建复合体系,利用  $V_2O_5$  与导电材料之间强烈的界面极化作用来损耗电磁波。另外,通过插层策略调节层间距

与介电常数优化阻抗匹配,同样也是提升  $V_2O_5$  基雷达隐身材料的有效途径。考虑到  $V_2O_5$  本身的电磁波损耗能力较差,故应用案例较为有限。 $V_2O_5$  在近红外、中红外波段具有很强的透射率<sup>[76-77]</sup>,是激光致盲防护领域的一种重要材料,然而在红外隐身的关键波段的远波段透射率不足,同时具有高发射率,无法有效模拟背景红外辐射或掩盖目标的热信号。因此, $V_2O_5$  在常规中远红外隐身缺乏实用价值。基于上述特性分析,本文后续将聚焦于  $V_2O_5$  在雷达隐身相关应用。

界面弛豫极化强度与频率和绝对电负性有关<sup>[78]</sup>,绝对电负性即两者吸收电子能力的差值大小。相对于  $V_2O_5$ ,还原氧化石墨烯是一种高导电性材料,两者吸收电子能力差值大,故产生的界面弛豫极化强度高,能够增强  $V_2O_5$  基雷达隐身材料的介电损耗能力。Zhang 等<sup>[79]</sup>首次成功制备含有还原氧化石墨烯纳米片和  $V_2O_5$  纳米带(RGO/ $V_2O_5$ )的新型双功能复合水凝胶,在石墨烯纳米片中生长  $V_2O_5$  纳米带,其中 3D 多孔界面增强界面极化损耗,且由于 RGO 高导电性容易导致阻抗失配,加入的  $V_2O_5$  使介电常数降低,优化阻抗匹配。配合网络结构带来的电导损耗,最终在协同作用下最小反射损耗为-21.5 dB,最大有效吸收带宽为 6.36 GHz。另外, $V_2O_5$  材料结合导电聚合物的高导电特性,配合插层策略同样能实现增强的极化损耗。Chen 等<sup>[80]</sup>将  $V_2O_5$  与导电聚合物聚噻吩结合,构建有机-无机非均质结构,从而获得优异的雷达隐身性能。该复合材料中,有机相增强整体电导损耗,并与无机相之间形成增强的界面极化,两者协同形成了介电-电导损耗机制,其中 PTVO-30(聚噻吩插层  $V_2O_5$ ,聚噻吩用量 30  $\mu$ L)在 1.9 mm 厚度下有效吸收带宽达 6.0 GHz。基于这类雷达隐身材料的设计思路,采用超晶格结构进一步放大界面极化效应。鉴于此,Wang 等<sup>[81]</sup>制备 PANI- $V_2O_5$  有机-无机超晶格结构,在分子尺度上调节两者之间的异质界面来达成超极化损耗,从而在 2.1 mm 处的有效吸收带宽为 6.4 GHz。

另外,对  $V_2O_5$  进行微观形貌设计,结合生物质碳基结构,通过介电损耗优化与不同尺度下结构调控来实现高效雷达隐身。Yu 等<sup>[82]</sup>以蒲公英纤维为模板,成功制备链球形结构  $V_2O_5$ /C 复合材料。其复杂的形貌结构为电磁波传播提供众多路径,同时生物质碳骨架有助于优化阻抗匹配特性。此外,丰富的异质界面引起显著的界面极化效应,而晶体缺陷与表面官能团则诱导了偶极子极化。在

电导-介电损耗协同作用下,复合材料表现出较为优异的电磁波吸收性能,最小反射损耗达-34.05 dB,在 2.35 mm 下最大有效吸收带宽为 7.52 GHz。对比前文所述  $V_2O_5$ /RGO、 $V_2O_5$ -PANI 等吸波材料,吸收强度大幅加强,同时保留了高带宽的特性,还具有一定的环境友好性,为  $V_2O_5$  在雷达隐身领域发展提供新的解决方案。

通过调控材料的微观形貌特征来提升性能,是一种简单而有效的方法,Zhen 等<sup>[83]</sup>通过表面活性剂辅助水热法并引入后退火工艺,合成不同形貌特征的  $V_2O_5$ ,包括纳米棒、纳米颗粒与微粒,为后续进一步发展  $V_2O_5$  雷达隐身材料提供微观形貌调控方法。基于  $V_2O_3$  与  $V_2O_5$  的雷达隐身材料性能参数见表 2<sup>[65-69,71,74,75,79,80-82]</sup>。

综上所述,基于  $V_2O_3$  的雷达隐身材料主要围绕  $V_2O_3$  窄带隙带来的高介电损耗以及高导电特性展开研究,没有  $VO_2$  基雷达隐身材料的可调频段特性,但无需考虑相变导致的雷达隐身性能下降。目前基于  $V_2O_3$  的吸波材料主要有三种设计策略:一是加入金属元素,如 Ni、Co<sup>[69,71,74]</sup> 等元素,引入磁损耗机制来进一步强化隐身性能;二是构建复杂形貌特征,如纳米棒<sup>[84]</sup>、空心球体<sup>[69]</sup>、层状结构<sup>[75]</sup>、核壳结构<sup>[65-66]</sup> 和网状多孔结构<sup>[85]</sup>,这些结构调控设计在强化整体介电损耗能力的同时,也能为复合材料中引入磁性金属或其他材料提供可能;三是普遍引入碳元素<sup>[65,67-69,71]</sup>,采用碳包覆、碳纳米膜等方式优化阻抗匹配,随之增加的缺陷也能增强介电损耗。同时提升了材料本身的稳定性,将易变价的  $V_2O_3$  处在碳材料的保护之中,更好发挥其损耗能力。高温  $V_2O_3$  是最稳定的钒基氧化物<sup>[8]</sup>,这使得  $V_2O_3$  具有耐高温雷达隐身材料的应用潜力。对于  $V_2O_5$  来说,带隙与其他两者相比较宽,导电性与介电损耗能力稍差。基于此,采用结构调控设计增多异质界面,与高导电材料复合达到增强的界面极化效应来衰减电磁波。该类材料通常具有宽的有效吸收带宽,但损耗能力并不突出。也有文献指出,通过复杂结构设计以及介电损耗策略同样能显著提升其隐身性能<sup>[82]</sup>。另外, $V_2O_5$  与异价离子掺杂( $Li^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ )会显著提升电导性<sup>[86]</sup>,可利用异价离子掺杂改性来弥补  $V_2O_5$  介电损耗能力的不足,并搭配其他损耗策略,进一步加强雷达隐身能力。

## 4 结束语

综上所述,目前应用于隐身材料领域大多数为

表 2 基于  $V_2O_3$  和  $V_2O_5$  的吸波材料主要参数  
Table 2 Main parameters of absorbing materials based on  $V_2O_3$  and  $V_2O_5$

Absorbent	Microstructure	$RL_{\min}/\text{dB}$	EAB/GHz	Thickness/mm
$V_2O_3/\text{Zn}@C$ <sup>[75]</sup>	Wheatear shape core-shell structure	-56.50	5.25	
$V_2O_3@C$ <sup>[65]</sup>	Nanorods structure	-56.00	7.21	1.70
$\text{NiCo}@C/V_2O_3$ <sup>[71]</sup>	Petaloid structure	-57.40	5.36	1.60
$\text{Co}/C@V_2O_3$ <sup>[69]</sup>	Hollow spheres structure	-40.10	4.64	1.50
$\text{RGO}/V_2O_5$ <sup>[79]</sup>	Composite hydrogel	-21.50	6.36	
$V_2O_3$ sphere <sup>[66]</sup>	Bilayer core-shell structure	-67.12	5.49	2.20
$V_2O_3@Co/Co_3O_4/Ni$ <sup>[74]</sup>	Core-double shell structure	-59.60	6.80	2.26
$V_2O_3@C/BWs$ <sup>[67]</sup>	Heterostructure	-59.30	6.56	
$V_2O_5$ -conducting polymers <sup>[80]</sup>	Organic-inorganic heterostructure		6.00	1.90
$V_2O_5$ -PANI <sup>[81]</sup>	Organic-inorganic superlattice structure		6.40	2.10
$V_2O_3@C$ <sup>[68]</sup>	Original spindle structure	-19.50	5.20	1.70
$V_2O_5/C$ <sup>[82]</sup>	Chain-like spherical structure	-34.05	7.52	2.35

$VO_2$ 、 $V_2O_3$  和  $V_2O_5$  这 3 种氧化物。由于钒基氧化物材料具有较为优异的电导率、丰富的多价态、形貌特征较容易控制等特点,在电磁隐身、红外隐身、电池、电容器等领域均有应用。其中  $VO_2$  因具有显著的热相变特性而被广泛用于红外与微波波段的可调智能化隐身材料,在解决单一吸波频段问题中具有较大优势。 $V_2O_3$  由于相变温度过低,目前通常将其作为一种优异的介电损耗型材料使用。 $V_2O_5$  因其介电损耗能力不突出,较前两者略低,目前利用  $V_2O_5$  独特层状结构以及与高导电材料复合,利用其增强的界面极化作用损耗电磁波。未来钒基氧化物隐身材料发展主要集中在以下 5 个方向:

(1) 钒基氧化物雷达隐身材料损耗机制较为单一,多数均聚焦于介电-导电损耗机制,通过添加磁性金属材料加入磁损耗机制成为增强该类材料雷达隐身性能的一个重要发展方向。

(2) 传统研究中,钒基隐身材料的成分-结构-性能关系(掺杂比例、形貌维度)主要依赖经验性探索。对于雷达与红外多波段领域,多变量耦合场景使传统方法难以高效优化。随着人工智能技术的不断发展,利用人工智能辅助材料设计已然成为未来开发高性能钒基氧化物隐身材料的重点发展方向与前沿趋势。

(3) 利用  $VO_2$  的雷达/红外波段相变特性,复合不同材料,使其能够兼顾不同用途的多频段隐身,如雷达/红外隐身材料、可见光/红外隐身材料、

红外隐身/超疏水材料等。多用途性、多频段适应性是未来隐身材料重要的发展方向,但也存在单一材料难以满足不同波段性能需求的挑战。

(4) 钒基氧化物中结构形貌设计众多,如核壳结构、双层核壳结构、花状结构等,利用不同材料复合结合创新性结构形貌设计能够为其提供更强大的隐身能力以及更宽的隐身频段。探寻与构建新的形貌特征成为钒基氧化物隐身材料一大发展重点。

(5) 复合策略是提升钒基氧化物隐身性能的重要手段,但由于钒基氧化物多价态的特性,使其易与其他相形成复杂的化学价态梯度、缺陷集中区及晶格畸变区,这些微观结构对于隐身性能调控发挥显著作用,未来需重点突破界面结构表征难题,深化对复合体系吸波机理的认知,为后续合成高性能钒基氧化物隐身材料提供理论支撑与实验依据。

#### 参考文献:

- [1] TAN X, GU W H, TAO Z, et al. Carbon-based materials for radar-infrared compatible stealth technology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160168.
- [2] JIN L, ZHAO Y M, CHEN C, et al. Application, development, and challenges of stealth materials/structures in next-generation aviation equipment[J]. *Applied Surface Science Advances*, 2024, 19: 100575.
- [3] 桑建华, 周海. 飞行器表面电磁缺陷及雷达吸波材料应用[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(2): 51-55.  
SANG J H, ZHOU H. The electromagnetic discontinuities of the aircraft surface and an application of the radar

- absorbing materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2003, 23(2): 51-55.
- [4] 孙敏, 张雨. 隐身材料测试技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [5] 郭锦程, 任素娥, 陈彦飞. 高温红外隐身材料研究进展[J]. *材料工程*, 2025, 53(1): 45-54.
- GUO J C, REN S E, CHEN Y F. Research progress in high-temperature infrared stealth materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(1): 45-54.
- [6] 陈宇方, 马国伟, 周永江, 等. 智能雷达隐身材料研究现状[J]. *材料导报*, 2011, 25(23): 40-44.
- CHEN Y F, MA G W, ZHOU Y J, et al. Status of smart radar stealthy materials[J]. *Materials Review*, 2011, 25(23): 40-44.
- [7] DEVTHADE V, LEE S. Synthesis of vanadium dioxide thin films and nanostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(23): 231101.
- [8] SURNEV S, RAMSEY M G, NETZER F P. Vanadium oxide surface studies[J]. *Progress in Surface Science*, 2003, 73(4/5/6/7/8): 117-165.
- [9] SZYMANSKI N J, LIU Z T Y, ALDERSON T, et al. Electronic and optical properties of vanadium oxides from first principles[J]. *Computational Materials Science*, 2018, 146: 310-318.
- [10] 李尧, 卢怡, 曹文斌. W掺杂二氧化钒的水热晶化机理及其相变性能[J]. *材料工程*, 2017, 45(11): 58-65.
- LI Y, LU Y, CAO W B. Crystallization mechanism and phase transition properties of W-doped VO<sub>2</sub> synthesized by hydrothermal method[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(11): 58-65.
- [11] DMITRIEV A V, SHALAEVA E V, VLADIMIROVA E V, et al. Stabilization of metallic phase in nanostructured hollow V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spheres prepared by ultrasonic spray pyrolysis[J]. *Materials Research Bulletin*, 2023, 167: 112391.
- [12] VIJAYAKUMAR P, SETHUPATHI N, MAHALINGAM P, et al. Efficient electrochemical performance of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SrO nanocomposite electrode for supercapacitor application[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 119: 116318.
- [13] 刘顺华, 刘军民, 董星龙. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [14] 张玉龙, 李萍, 石磊. 隐身材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [15] 彭智慧, 曹茂盛, 袁杰, 等. 雷达吸波材料设计理论与方法研究进展[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(3): 58-63.
- PENG Z H, CAO M S, YUAN J, et al. Progress in design theory and methods research on radar absorbing materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2003, 23(3): 58-63.
- [16] 陈旭生, 李九生. 缺陷组合嵌入 VO<sub>2</sub> 薄膜结构的可调太赫兹吸收器[J]. *物理学报*, 2020, 69(2): 233-239.
- CHEN X S, LI J S. Tunable terahertz absorber with multi-defect combination embedded VO<sub>2</sub> thin film structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(2): 233-239.
- [17] LI M Y, FANG C Q, CHENG Y L, et al. A facile pathway to fabricate VO<sub>2</sub>(M) nanoparticles via sol-gel method for flexible thermochromic films with efficient infrared stealth[J]. *Vacuum*, 2024, 221: 112885.
- [18] JI H N, LIU D Q, ZHANG C Y, et al. VO<sub>2</sub>/ZnS core-shell nanoparticle for the adaptive infrared camouflage application with modified color and enhanced oxidation resistance[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 176: 1-8.
- [19] LIANG S H, GUAN H, ZHANG H N, et al. Intelligent off/on switchable electromagnetic wave absorbing material based on VO<sub>2</sub> nanowires[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151025.
- [20] CHEN W X, XING H L, GAO S T, et al. Bi-semiconductor heterojunction Cu<sub>9</sub>S<sub>5</sub>@VO<sub>2</sub> microspheres with morphology regulation as broadband high-performance electromagnetic wave absorber[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 610: 155539.
- [21] BISWAS S. First-principles investigation of the metal-insulator transitions in Ti-substituted tetragonal rutile VO<sub>2</sub>[J]. *Vacuum*, 2023, 211: 111922.
- [22] ZHANG Y Q, XIONG W M, CHEN W J, et al. Recent progress on vanadium dioxide nanostructures and devices: fabrication, properties, applications and perspectives[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 338.
- [23] GAO S T, ZHANG Y C, CHEN W X, et al. Heterojunction MoS<sub>2</sub>@VO<sub>2</sub> microspheres for electromagnetic wave absorption in the X-band[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(11): 6255-6265.
- [24] MA L, SI H X, FENG K L, et al. Intelligent microwave absorption of VO<sub>2</sub>@PDA/RGO composites based on dynamic interfacial polarization performance[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(19): 195102.
- [25] JI H N, LIU D Q, CHENG H F, et al. Hydrothermal synthesis and phase transition properties of uniform free-standing vanadium dioxide nanowires[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(12): 3601-3605.
- [26] 付宇, 王洋, 蔡明. 气凝胶/纤维复合材料的热学和力学性能以及界面相容性的研究进展[J]. *材料工程*, 2023, 51(11): 1-13.
- FU Y, WANG Y, CAI M. Progress in thermal and mechanical properties and interfacial compatibility of aerogel/fiber composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(11): 1-13.
- [27] WANG S N, HAO X Q, LIU Y J, et al. Intelligent tunable wave-absorbing CNTs/VO<sub>2</sub>/ANF composite aero-

- gels based on temperature-driving[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(25): 32773-32783.
- [28] CHENG Z, WANG R F, CAO Y S, et al. Intelligent off/on switchable microwave absorption performance of reduced graphene oxide/VO<sub>2</sub> composite aerogel[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(40): 2205160.
- [29] LIU J L, ZHANG S Y, QU D, et al. Defects-rich heterostructures trigger strong polarization coupling in sulfides/carbon composites with robust electromagnetic wave absorption[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 17(1): 24.
- [30] LIU J L, LIU Z L, REN J K, et al. Selective ions exchange reactions endow defective heterovalent copper-based selenides with enhanced dielectric polarization response[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(22): 2420239.
- [31] LIU J L, YIN M X, LIU Z L, et al. Solvent-engineered *in-situ* heterogenization of copper-based sulfides for broadening electromagnetic wave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160742.
- [32] MAO F Z, LONG L, ZENG G L, et al. Achieving excellent electromagnetic wave absorption property by constructing VO<sub>2</sub> coated biomass carbon heterostructures[J]. *Diamond and Related Materials*, 2022, 130: 109422.
- [33] CHEN Y, MA Q S, LI X, et al. Synthesis, characterization and electromagnetic absorbing performance of multi-step petaloid morphology VO<sub>2</sub>(M)[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(16): 25493-25502.
- [34] PAN F, PEI K, CHEN G, et al. Integrated electromagnetic device with on-off heterointerface for intelligent switching between wave-absorption and wave-transmission[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(49): 2306599.
- [35] 潘志浩. VO<sub>2</sub>/环氧树脂复合材料的设计制备及其智能调频吸波性能研究[D]. 开封: 河南大学, 2024.
- PAN Z H. Preparation of VO<sub>2</sub>/epoxy resin composites for intelligent frequency modulation microwave absorption[D]. Kaifeng: Henan University, 2024.
- [36] LIAO S Y, WANG X Y, SHI Y Y, et al. Reversible switching between microwave absorption and EMI shielding of VO<sub>2</sub> composite foam[J]. *Small*, 2024: 2402841.
- [37] CHEN X T, GUO S N, TAN S J, et al. An environmentally friendly chitosan-derived VO<sub>2</sub>/carbon aerogel for radar infrared compatible stealth[J]. *Carbon*, 2023, 213: 118313.
- [38] 文娇, 李介博, 孙井永, 等. 红外探测与红外隐身材料研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(3): 66-82.
- WEN J, LI J B, SUN J Y, et al. Research progress of infrared detection and infrared stealth materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(3): 66-82.
- [39] GAO Y, YANG Q, MA L, et al. Radar-infrared compatible stealth technology in advanced nano-composite materials: mechanisms and structural optimization[J]. *Materials Today Nano*, 2024, 28: 100534.
- [40] 冯利利, 刘一曼, 姚琳, 等. 基于红外隐身及多波段兼容隐身材料[J]. *化学进展*, 2021, 33(6): 1044-1058.
- FENG L L, LIU Y M, YAO L, et al. Infrared stealth and multi-band compatible stealth materials[J]. *Progress in Chemistry*, 2021, 33(6): 1044-1058.
- [41] SILVEIRA F E M, KURCBART S M. Hagen-Rubens relation beyond far-infrared region[J]. *Europhysics Letters*, 2010, 90(4): 44004.
- [42] JI H N, LIU D Q, CHENG H F, et al. Vanadium dioxide nanopowders with tunable emissivity for adaptive infrared camouflage in both thermal atmospheric windows[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 175: 96-101.
- [43] NIU J L, WANG Y, ZOU X L, et al. Infrared electrochromic materials, devices and applications[J]. *Applied Materials Today*, 2021, 24: 101073.
- [44] WU X Y, YUAN L, WENG X L, et al. Passive smart thermal control coatings incorporating CaF<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> core-shell microsphere structures[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3908-3914.
- [45] 马创, 王振, 王新宇, 等. 红外可变发射率材料的研究[J]. *激光与红外*, 2024, 54(12): 1871-1878.
- MA C, WANG Z, WANG X Y, et al. Study of infrared variable emissivity materials[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(12): 1871-1878.
- [46] LI B, TIAN S Q, WANG Z, et al. Thermochromic Ta doped VO<sub>2</sub> films: enhanced luminous transmittance, significantly depressed phase transition temperature and hysteresis width[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 568: 150959.
- [47] ZHANG L M, XIA F, YAO J N, et al. Facile synthesis, formation mechanism and thermochromic properties of W-doped VO<sub>2</sub>(M) nanoparticles for smart window applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(38): 13396-13404.
- [48] KIM H J, CHOI Y H, LEE D, et al. Enhanced passive thermal stealth properties of VO<sub>2</sub> thin films *via* gradient W doping[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 561: 150056.
- [49] WANG J, ZENG L, XIA M X, et al. Vanadium dioxide/aluminum composites for adaptive infrared stealth[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(14): 25034-25040.
- [50] LI M Y, CHENG Y L, FANG C Q, et al. W/Al co-doping VO<sub>2</sub> nanoparticles for high performance passive infrared stealth films with enhanced durability[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(1): 1443-1451.

- [51] CHEN F, YUAN L, WU X Y, et al. Simultaneous tuning of the phase transition temperature and infrared optical properties of Mo-doped VO<sub>2</sub> powders for intelligent infrared stealth materials[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(15): 25585-25593.
- [52] PHOEMPOON P, SIKONG L. Synthesis of thermochromic Mo-doped VO<sub>2</sub> particles[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 867: 88-92.
- [53] JI H N, LIU D Q, CHENG H F, et al. Infrared thermochromic properties of monoclinic VO<sub>2</sub> nanopowders using a malic acid-assisted hydrothermal method for adaptive camouflage[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(9): 5189-5194.
- [54] LI D L, DENG S S, ZHAO Z J, et al. VO<sub>2</sub>(M)@SnO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles: improved chemical stability and thermochromic property rendered by SnO<sub>2</sub> shell[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 598: 153741.
- [55] LI M Y, FANG C Q, CHENG Y L, et al. Core-shell W-VO<sub>2</sub>@CeO<sub>2</sub> nanoparticle with enhanced oxidation resistance for adaptive infrared stealth application[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(10): 13298-13308.
- [56] GAO J, ZHANG H N, HAN X G, et al. The excellent infrared radiation regulation ability of VO<sub>2</sub> nanorods[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 276: 113082.
- [57] LI C C, CHE P P, XIE B S, et al. Dual-phase change composites with temperature control and low infrared emissivity properties fabricated by electrospinning for infrared stealth and thermal camouflage[J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(12): 3755-3765.
- [58] FANG K Y, WANG Y J, ZHAO Y C, et al. Infrared stealth nanofibrous composites with thermal adaptability and mechanical flexibility[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 201: 108483.
- [59] ZHANG X K, LI N, HU Z M, et al. Direct fabrication of poly(p-phenylene terephthalamide) aerogel and its composites with great thermal insulation and infrared stealth [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 388: 124310.
- [60] 程红飞, 黄大庆. 多频谱兼容隐身材料研究进展[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(5): 93-99.  
CHENG H F, HUANG D Q. Research progress in multi-spectrum compatible stealth materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(5): 93-99.
- [61] QAZILBASH M, SCHAFFGANS A, BURCH K, et al. Electrodynamics of the vanadium oxides VO<sub>2</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(11): 111-121.
- [62] JI H N, LIU D Q, CHENG H F, et al. Facile synthesis and electrical switching properties of V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2017, 217: 1-6.
- [63] FU M, ZHUANG Q R, ZHU Z T, et al. Facile synthesis of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/graphene composites as advanced electrode materials in supercapacitors[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 862: 158006.
- [64] DHOUNDIYAL H, DAS P, BHATNAGAR M C. Synthesis of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanostructures and electrical transport properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoparticle[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 2830-2832.
- [65] CHENG S Y, ZHANG C, WANG H, et al. Carbon nanofilm stabilized twisty V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorods with enhanced multiple polarization behavior for electromagnetic wave absorption application[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 119: 37-44.
- [66] ZHAO J R, WANG H, LI Y, et al. Construction of self-assembled bilayer core-shell V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microspheres as absorber with superior microwave absorption performance[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 639: 68-77.
- [67] NI A Q, XIONG Z Q, ZHANG Y N, et al. Rail-like heterostructured porous carbon composites derived from vanadium metal-organic framework/butterfly wings for enhanced microwave absorption[J]. *Carbon*, 2024, 221: 118930.
- [68] ZHU Y T, GUAN X M, YANG Z H, et al. Regulation of component transformation in MOF-derived vanadium oxide@C spindles for high-performance electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 865: 158886.
- [69] ZHOU C H, WU C, LIU D, et al. Metal-organic framework derived hierarchical Co/C@V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hollow spheres as a thin, lightweight, and high-efficiency electromagnetic wave absorber[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2019, 25(9): 2234-2241.
- [70] LIANG C B, HE J, ZHANG Y L, et al. MOF-derived CoNi@C-silver nanowires/cellulose nanofiber composite papers with excellent thermal management capability for outstanding electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 224: 109445.
- [71] ZHOU J X, JIA Z R, ZHANG Y, et al. Construction of 3D conductive network by flower-like V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> synergy with magnetic NiCo for superior electromagnetic wave absorption performance[J]. *Materials Today Physics*, 2022, 29: 100902.
- [72] LIU T, PANG Y, ZHU M, et al. Microporous Co@CoO nanoparticles with superior microwave absorption properties[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(4): 2447.
- [73] WU H J, WU G L, WU Q F, et al. Facile synthesis and microwave absorbability of C@Ni-NiO core-shell hybrid solid sphere and multi-shelled NiO hollow sphere[J]. *Materials Characterization*, 2014, 97: 18-26.
- [74] ZHAO J R, WANG H, JIAO J M, et al. Hierarchical

- waxberry-like  $V_2O_3@Co/Co_3O_4/Ni$  absorbers with remarkable microwave absorption *via* regulation of magnetic and dielectric loss[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 642: 158582.
- [75] WANG Y J, JIA W N, PANG Z B, et al. High-performance electromagnetic wave absorption of nitrogen carbon doped composite materials with vanadium based nanowire structure at 2-18 GHz[J]. *Vacuum*, 2024, 220: 112826.
- [76] 张圣斌, 左敦稳, 卢文壮, 等. 基于不同衬底的五氧化二钒薄膜光电特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 321-328.  
ZHANG S B, ZUO D W, LU W Z, et al. Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films deposited on different substrates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 321-328.
- [77] 张圣斌, 左敦稳, 卢文壮, 等. 磁控溅射法制备的五氧化二钒薄膜光电特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2438-2445.  
ZHANG S B, ZUO D W, LU W Z, et al. Optical and electrical properties of vanadium pentoxide films prepared by RF reactive magnetron sputtering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2438-2445.
- [78] LV H L, YANG Z H, PAN H G, et al. Electromagnetic absorption materials: current progress and new frontiers[J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 127: 100946.
- [79] ZHANG H, XIE A J, WANG C P, et al. Bifunctional reduced graphene oxide/ $V_2O_5$  composite hydrogel: fabrication, high performance as electromagnetic wave absorbent and supercapacitor[J]. *ChemPhysChem*, 2014, 15(2): 366-373.
- [80] CHEN J, YE W P, WANG S, et al. Design of two-dimensional organic-inorganic heterostructures for high-performance electromagnetic wave absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(32): 10816-10827.
- [81] WANG W J, RAN K, HOU X W, et al. Interfacial modulation of organic-inorganic two-dimensional superlattices for efficient electromagnetic wave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138692.
- [82] YU J Q, LI Y Q, DUAN G G, et al. Bio-templated fabrication of chain-spherical  $V_2O_5/C$  composites from dandelion fiber for high-efficiency electromagnetic wave absorption[J]. *Vacuum*, 2022, 195: 110683.
- [83] ZHEN Q, LI L, LI R, et al. Morphology controllable preparation and infrared emissivity of vanadium pentoxide[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 303-306.
- [84] HAO Z Y, JIANG W K, ZHU K Y. Carbon-encapsulated  $V_2O_5$  nanorods for high-performance aqueous Zn-ion batteries[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, 10: 956610.
- [85] LIU C S, YE X, ZHOU B Y, et al. 2D mesoporous nanomesh from N-doped carbon-encapsulated  $V_2O_5$  nanowires as an anode for lithium-ion batteries[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, 124(44): 24073-24080.
- [86] SABNA M, JAYARAM P, SAFNA K, et al. Correlating structural and electronic properties with energy dissipation, polarization dynamics, and dielectric responses in  $V_2O_5-NiO-Sb_2O_3$  micro-ceramics[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2025, 704: 417010.

收稿日期: 2025-05-28; 录用日期: 2025-09-18

通讯作者: 刘朝辉(1982—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为功能材料, 联系地址: 陕西省西安市未央区未央湖街道学府中路西安工业大学(710021), E-mail: lzh5011@163.com

(本文责编: 张 琴)