



动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶研究进展

程青青¹, 张学同^{1,2*}

1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 苏州 215123

2. 皖西学院材料与化工学院, 六安 237012

* 联系人, E-mail: xtzhang2013@sinano.ac.cn

2026-04-21 收稿, 2026-06-11 修回, 2026-06-12 接受, 2026-06-12 网络版发表

国家自然科学基金(52303388, 22572216)、江苏省自然科学基金(BK20251820)和中国博士后科学基金(2025M780196)资助

摘要 气凝胶是一类具有三维网络结构的多孔性固体纳米材料. 多样的材料体系以及超低密度、超高孔隙率、超大比表面积等独特性能, 使气凝胶成为学术界与产业界共同关注的研究热点. 发展能够与现有多种湿法加工工艺相兼容的成型技术, 对于推动气凝胶的广泛应用意义重大. 由于纳米构筑基元与小分子凝胶因子在扩散速率上存在显著差异, 胶体气凝胶前驱体的溶胶-凝胶转变过程能够与湿法纺丝、湿法制膜及湿法3D成型等现有动态湿法成型工艺实现良好兼容, 显著拓宽了气凝胶的成型方式. 本文综述了中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所在动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶方面的最新研究进展, 涵盖胶体气凝胶纤维、胶体气凝胶薄膜及胶体气凝胶三维块体材料. 通过系统分析不同类型胶体气凝胶的材料特性与功能机制, 探讨了各类气凝胶制品在实际应用中的潜力. 最后, 本文展望了动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶的未来发展方向, 提出了潜在的研究热点与技术突破点, 以期为相关领域的研究与应用提供参考.

关键词 气凝胶, 湿法纺丝, 卷对卷加工, 3D打印, 动态溶胶凝胶转变

气凝胶是指通过溶胶凝胶转变及特种干燥过程获得的一种三维纳米多孔固体材料^[1~6]. 其独特的三维纳米固体网络-空气结构赋予自身一系列极端物理特性, 如超高孔隙率、超大比表面积以及极低热导率等^[7~10]. 根据起始组分和凝胶化过程的不同, 以小分子为前驱体、通过聚合反应组装而成的气凝胶可称为分子气凝胶^[11~16], 而以不同维度纳米构筑基元为起始组分、经分散-稳定-失稳过程形成的气凝胶可称为胶体气凝胶^[2,3]. 与前者相比, 后者具有以下优势: (1) 克服无缩聚反应活性物质不能制备成气凝胶的弊端; (2) 可最大限度地利用已经发展的不同尺寸、形貌、组成和性质的纳米构筑基元. 当前, 胶体气凝胶种类已经涉及到无机氧化物、有机聚合物、碳材料、生物质及其复合材料, 在航空航天、超级绝热、环境修复、催化载体、能源

器件及生物医学等前沿领域扮演着日益重要的角色^[5,17~21].

胶体气凝胶的宏观形态与其应用场景密切相关, 而成型工艺的选择直接决定了其形态与性能. 基于静态溶胶-凝胶转变策略的间歇式成型工艺是指前驱体溶胶在相对静止的条件下, 通过调节pH、温度或引入凝胶因子等方式发生凝胶化, 随后经溶剂置换和干燥得到纤维、薄膜或块体状气凝胶^[22~27]. 相比之下, 基于动态溶胶-凝胶转变的成型工艺, 包括湿法纺丝、卷对卷成型或3D打印等, 具有以下优势: (1) 高效连续, 可突破批次生产的限制, 实现气凝胶纤维、薄膜的千米级连续制备; (2) 结构可控, 通过调控外场参数可调控气凝胶结构参数, 从而构筑高性能气凝胶; (3) 几何可编程, 特别是3D打印技术的引入, 使得任意复杂形状

引用格式: 程青青, 张学同. 动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶研究进展. 科学通报, 2026, 71: 6441–6454

Cheng Q, Zhang X. Research progress on the fabrication of colloidal aerogels by dynamic wet-forming processes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 6441–6454, doi: [10.1360/CSB-2026-0554](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0554)

的气凝胶构件可按需制造,极大拓展了其应用边界^[2,3,8,28]。在动态湿法成型过程中,胶体气凝胶前驱体受到宏观剪切、拉伸或挤出等外场作用,纳米构筑基元的扩散速度远小于小分子凝胶因子的扩散速度,这一显著差异使得胶体气凝胶前驱体的溶胶-凝胶转变过程能够与诸多传统湿法成型工艺良好兼容^[2]。

尽管动态湿法成型工艺在胶体气凝胶制备领域取得了长足进步,但相关研究仍较为分散,缺乏对工艺原理、材料体系、结构与应用之间内在联系的系统梳理。基于此,本文以胶体气凝胶为对象,首先阐述了静态与动态溶胶-凝胶转变策略的基本原理与差异,随后重点综述了中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所在动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶方面的最新研究进展,系统分析了其在环境处理、能源存储与转换、电磁/力防护、热管理、生物医用等领域的应用,并对其未来发展方向进行了展望。本文旨在为气凝胶材料的先进制造及其功能化应用提供系统性参考。

1 胶体气凝胶的合成策略

胶体气凝胶的制备核心在于溶胶-凝胶转变过程,即通过特定的化学或物理手段,使稳定分散的纳米构筑基元发生交联、聚集,形成充满液体的三维网络结构^[2]。根据其凝胶化过程是否伴随宏观流动,可将其合成策略分为静态溶胶-凝胶转变策略与动态溶胶-凝胶转变策略。

1.1 静态溶胶-凝胶转变策略

静态溶胶-凝胶转变策略是指将前驱体溶胶注入模具或涂覆在基板后,在无宏观流动的条件下静置,通过引发化学反应或物理变化使其缓慢凝胶化的方法。整个凝胶化过程中,溶胶处于相对静止的状态,宏观形状的固定与凝胶网络的形成先后发生,凝胶时间通常为几分钟至数天^[22,29]。从热力学角度看,静态溶胶-凝胶转变是一个体系自由能降低的过程。前驱体溶胶处于亚稳态,通过改变温度、pH、溶剂组成或加入化学凝胶因子,可打破原有的分散平衡。动力学上,静态溶胶-凝胶转变速率取决于凝胶化机制的类型^[30]。通常,对于通过化学凝胶因子引发的胶体凝胶化体系,如MXene纳米片与 Ca^{2+} 的交联,交联点在纳米片之间随机形成,当交联密度达到渗透阈值时体系即会发生溶胶-凝胶转变^[31]。

研究者采用静态溶胶-凝胶转变策略,已实现多种

胶体气凝胶纤维、薄膜、块体的制备。例如,通过毛细限域法制备气凝胶纤维^[22](图1(a))、通过刮涂或旋涂法制备胶体气凝胶薄膜^[23,32,33](图1(b)),以及通过模具浇铸法制备大尺寸胶体气凝胶块体等^[27,34,35](图1(c))。其中,毛细限域法是指首先通过毛细力使气凝胶前驱体溶胶进入玻璃毛细管内腔,然后在毛细管限域空间内无宏观流动下静置完成前驱体的凝胶化。刮涂或旋涂法是指首先利用刮刀将气凝胶前驱体均匀地刮涂在静置的基板上或利用离心力将气凝胶前驱体均匀地旋涂在高速旋转的基板上,随后将其转移入凝固浴中,在无宏观流动下静置完成前驱体的凝胶化。静态溶胶-凝胶转变策略的优势是过程简单、对设备要求较低、成本较低,几乎适用于所有胶体气凝胶的合成,但缺点同样明显,包括生产效率低、难以连续化生产、难以构建复杂几何形状等。此外,纳米构筑基元排列无序导致难以获得各向异性性能,且凝胶化与成型过程分离容易导致最终气凝胶制品收缩不均和开裂等。

1.2 动态溶胶-凝胶转变策略

动态溶胶-凝胶转变策略的核心在于前驱体溶胶在宏观流动、拉伸或剪切等动态力场作用下发生快速凝胶化。凝胶化过程与宏观形状的固定过程在时间和空间上同步进行,即溶胶在运动中成型,在成型的同时完成凝胶化,凝胶时间通常为0.1~10 s,直接获得具有目标形状的凝胶体^[2,8]。动态溶胶-凝胶转变策略的热力学过程与静态溶胶-凝胶转变策略相似,即体系自由能降低仍是凝胶化的根本驱动力。而其动力学过程涉及到流场剪切速度、溶胶拉伸比、纳米构筑基元和凝胶因子扩散速度等参数。例如,剪切流场可改变纳米构筑基元与凝胶因子碰撞几率,从而在更低凝胶因子浓度下引发凝胶化;纳米构筑基元和凝胶因子的扩散速度与凝胶前沿推进速度直接相关^[8]。

动态溶胶-凝胶转变策略能与多种传统湿法工艺兼容,包括通过湿法纺丝连续制备胶体气凝胶纤维^[36]、通过卷对卷成型大面积胶体气凝胶薄膜^[37,38],以及通过墨水直写打印按需制造具有悬垂、网格等复杂形状的胶体气凝胶构件^[17,39,40]。该策略的优势是凝胶化快速、结构各向异性可控、易实现复杂几何形状的构筑,且生产效率高、可支持连续化生产,同时凝胶化与成型同步可减少收缩不均和开裂。然而,该策略对前驱体流变学性能和凝胶化速度要求较高,设备投资较大且工艺参数需要精细调控。

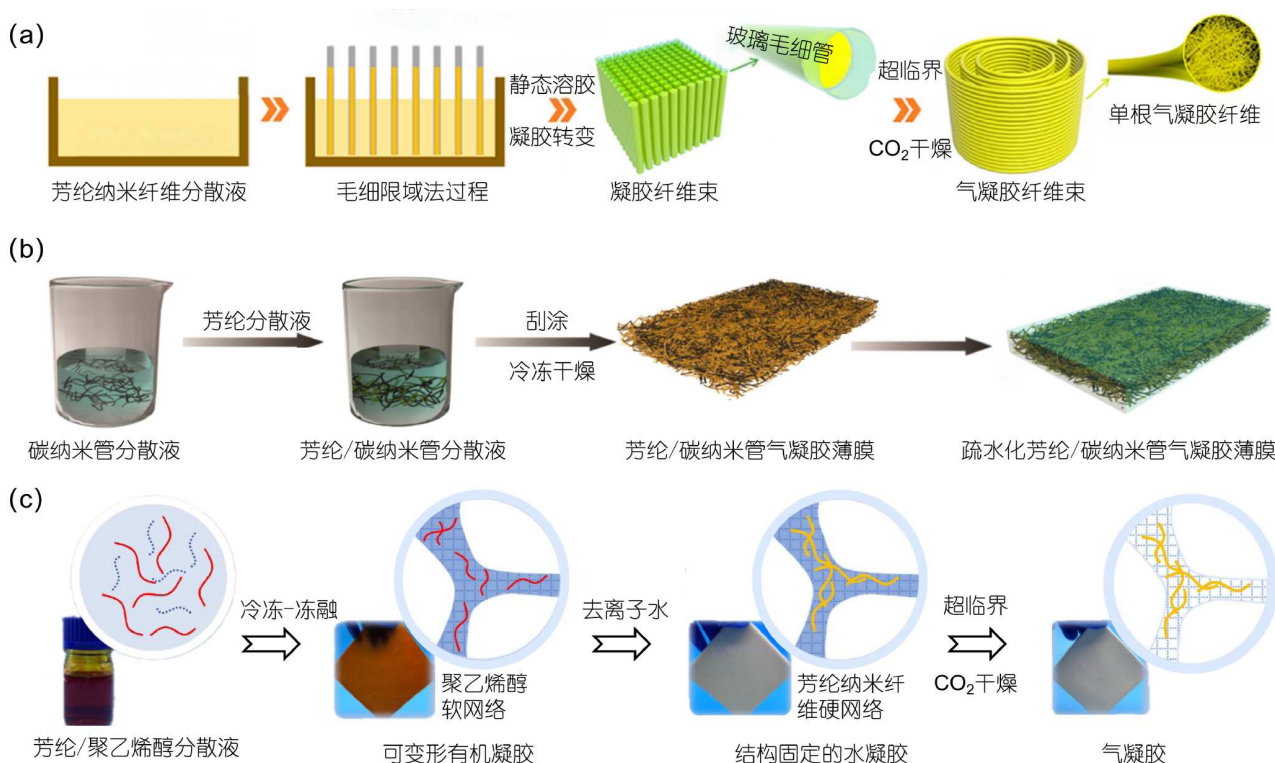


图1 静态溶胶-凝胶转变策略制备胶体气凝胶。(a) 毛细限域法制备芳纶胶体气凝胶纤维示意图^[22]; (b) 刮涂法制备芳纶/碳纳米管胶体气凝胶薄膜^[23]; (c) 模具浇铸法制备聚乙烯醇/芳纶胶体气凝胶块体^[27]

Figure 1 Static sol-gel transition strategy for fabricating aerogels. (a) Fabrication of aramid colloidal aerogel fibers by capillary confinement^[22]; (b) fabrication of aramid/carbon nanotube colloidal aerogel films by blade-coating^[23]; (c) fabrication of polyvinyl alcohol/aramid colloidal aerogel blocks by mold casting^[27]

2 动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶

胶体气凝胶的动态湿法成型工艺是指将纳米级构筑基元分散在特定溶剂中制成胶体分散液，胶体分散液在成型过程中原位发生动态溶胶凝胶转变，再经溶剂置换、特种干燥过程得到胶体气凝胶的工艺。研究者以不同维度纳米构筑基元为起始组分，采用动态湿法成型工艺已经实现了多种胶体气凝胶的制备，包括湿法纺丝制备胶体气凝胶纤维(图2(a))、卷对卷制备胶体气凝胶薄膜(图2(b))以及湿法3D打印制备胶体气凝胶块体(图2(c))^[17,18,26,31,36,37,39~53]，不同动态湿法成型工艺特点如表1所示。

2.1 湿法纺丝制备胶体气凝胶纤维

湿法纺丝技术制备胶体气凝胶纤维是指通过纺丝喷头将配制好的胶体分散液挤入到特定凝固浴中，胶体分散液与凝固浴发生快速物质交换。由于胶体分散液中纳米构筑基元的扩散速率远低于凝固浴中小分子

凝胶因子的扩散速度，胶体分散液瞬间原位发生动态溶胶-凝胶转变。所得的初生胶体凝胶纤维经溶剂置换和特种干燥得到相应的胶体气凝胶纤维^[8]。该工艺的核心在于胶体分散液的可纺性和快速溶胶凝胶转变能力。当前，湿法纺丝技术以其简便、易于实施的特点，成为制备胶体气凝胶纤维最广泛使用的方法。

在低速湿法纺丝方面，研究者报道了级联微流控纺丝技术^[49]。如图3(a)所示，研究者首先自行搭建了一套微流控去质子化-微流控纺丝设备，随后将一定质量的芳纶粉末溶解于含有叔丁醇钾和甲醇的二甲亚砜中得到混合液，之后将混合物泵入心形微通道反应器，反应温度设置在60~80℃之间，流速控制在0~0.5 mL/min，出口处得到的去质子化芳纶纳米纤维分散液可直接挤入到凝固浴中发生动态溶胶凝胶转变，得到芳纶胶体凝胶纤维，再经溶剂置换和超临界干燥后即可得到芳纶胶体气凝胶纤维。该技术借助连续流微通道反应器中局部剪切/混合作用及芳纶颗粒的旋转运动，首次量化了芳纶的动力学剥离模型，2 wt%芳纶纳米纤维分

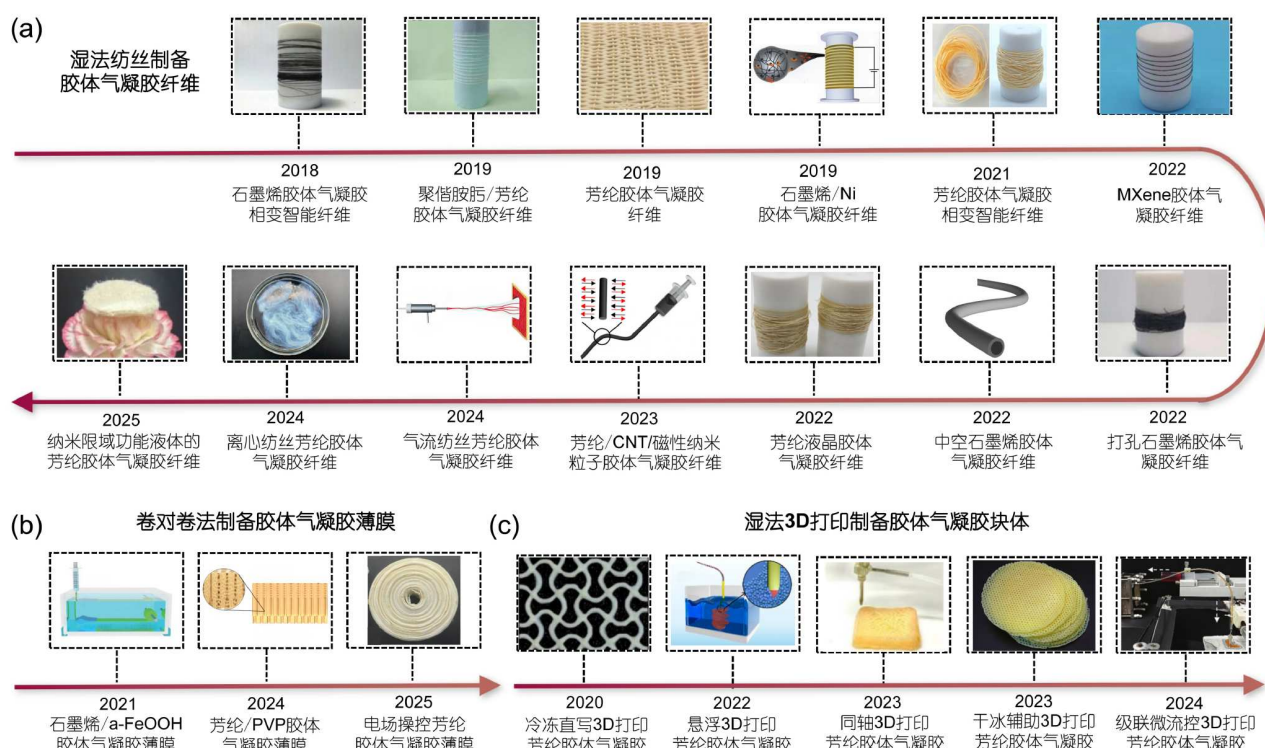


图2 动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶的时间线。(a) 湿法纺丝制备胶体气凝胶纤维^[18,31,36,41-43,45-48,50,51,53]；(b) 卷对卷法制备胶体气凝胶薄膜^[37,44,52]；(c) 湿法3D打印制备胶体气凝胶块体^[17,26,39,40,49]

Figure 2 Timeline of the fabrication of colloidal aerogels by dynamic wet-forming processes. (a) Fabrication of colloidal aerogel fibers by wet spinning^[18,31,36,41-43,45-48,50,51,53]; (b) fabrication of colloidal aerogel films by roll-to-roll processing^[37,44,52]; (c) fabrication of colloidal aerogel monoliths by wet 3D printing^[17,26,39,40,49]

散液的制备仅需7 min，纳米纤维直径范围控制在6~11 nm。更重要的是，该方法将芳纶纳米纤维纺丝液微流控质子化与微流控加工集为一体，实现了纺丝液配制-纤维成型的连续化生产，简化了传统的收集再加工步骤，减少了损耗，降低了生产成本。

在中速湿法纺丝方面，如图3(b)所示，研究者采用注射泵辅助挤出策略，相继实现了石墨烯胶体气凝胶纤维^[18]、芳纶胶体气凝胶纤维^[36]、MXene胶体气凝胶纤维^[31]的制备。例如，2018年，研究者报道了将氧化石墨烯液晶纺丝液纺入到含有抗坏血酸的溶液中，随后经化学还原、溶剂置换和超临界干燥等技术，首次制备得到了具有规整、连续、多孔的石墨烯胶体气凝胶纤维^[18]。进一步，将氧化石墨烯替换成打孔氧化石墨烯，可制备得到相应的打孔石墨烯胶体气凝胶纤维^[45]。在有机胶体气凝胶方面，2019年，研究者将芳纶纳米纤维分散液纺入聚酰胺脲/二甲亚砜凝固浴中，随后经水洗、溶剂交换和冷冻干燥得到了聚酰胺脲/芳纶胶体气凝胶复合纤维^[41]。随后，研究者通过溶解芳纶纤维获得

纳米纤维分散液，然后将其挤入水凝固浴中发生质子化凝胶，最后经特种干燥等过程制备出了具有高孔隙率和高比表面积 of 纯芳纶胶体气凝胶纤维^[36]。为进一步提升气凝胶纤维的力学性能，研究者通过提高芳纶纳米纤维浓度(8 wt%~10 wt%)，使其形成向列相液晶，并在纺丝过程中施加3.0倍牵伸比。液晶态的芳纶纳米纤维在剪切和拉伸流场下高度取向，经凝胶化和干燥后，所得气凝胶纤维的抗拉强度高达41 MPa，同时保持了0.037 W/(m K)的低热导率^[47]。为改善芳纶胶体气凝胶纤维的疏水性，研究者将正溴丁烷/乙醇混合溶剂作为凝固浴，使芳纶纳米纤维质子化凝胶的同时，烷烃通过竞争反应接枝到芳纶纳米纤维的N⁺位点上，超临界干燥后，所得纤维疏水角可达140°，展现出良好的疏水性^[43]。除石墨烯胶体气凝胶纤维和芳纶胶体气凝胶纤维外，研究者将Ti₃C₂T_x MXene纳米片纺丝液挤入到Ca²⁺凝固浴中，随后通过超临界CO₂干燥技术制备了一种MXene气凝胶纤维^[31]。该气凝胶纤维具有可调节的孔隙率(96.5%~99.3%)、高比表面积(142 m²/g)和低密

表 1 不同动态湿法成型工艺特点
Table 1 Characteristics of different dynamic wet-forming processes

	成型方式	典型材料体系	凝胶时间	是否连续化	适用形态	结构可控性	优点	局限性	文献
湿法 纺丝	级联微流控 纺丝	芳纶	数秒	是	纤维	纤维直径可控、 纳米构筑单元 取向	纺丝液配制与纤维 成型一体化、减少 损耗	微流控通道易堵 塞、单通道产量 较低	[49]
	注射泵辅助 挤出纺丝	芳纶、石墨 烯、MXene	数秒	是	实心/中空 纤维	纤维直径可控、 纳米构筑单元取 向、可获得皮层/ 芯层结构	设备简单、 易于调控	纺丝速度较低 (<20 m/min)	[18,31,36, 43,45~47]
	离心纺丝	芳纶	<1 s	是	超细纤维	纤维直径可调、 堆积密度可控	纺丝速度快(可达 700 m/min)、纤维直 径细	设备要求高、产 量受离心力限制	[51,53]
	气流纺丝	芳纶	<0.1 s	是	超细纤维/ 无纺布	纤维直径可调、 织物取向可控	纺丝速度极高 (300~700 m/s)、 可直接成布	设备复杂、 能耗高	[50]
卷对 卷法	基布辅助 卷对卷	芳纶/聚乙烯 吡咯烷酮	数秒~数 分钟	是	薄膜	膜厚可控、多级 孔结构可调	操作简单、与现有涂 布设备兼容性好	基布可能引入杂 质、剥离难度大	[37]
	电场辅助 卷对卷	芳纶	数秒~数 分钟	是	薄膜	纳米纤维取向可 控、膜厚可调	电场诱导取向增强力 学性能	需高压电源、电 极维护成本高	[52]
湿法3D 打印	物理湿法3D 打印	芳纶	<1 s	否	复杂块体	层间焊接、可获 得各向异性结构	分辨率高、适用 于热敏体系	需要低温环境	[39,40]
	化学湿法3D 打印	芳纶	数秒~数 分钟	否	复杂块体	化学交联网络、 支撑浴辅助成型	支持悬垂结构、 墨水流动性要求低	凝胶速率需匹配 打印速度	[17,26]

度(0.035 g/cm³)等特点. 得益于MXene纳米片的导电性以及由动态溶胶-凝胶湿法纺丝实现的高取向结构, 所得气凝胶纤维导电率高达10⁴ S/m, 远远超过其他已知的气凝胶材料. 此外, 通过改变喷丝头类型, 可以调控胶体气凝胶纤维的截面结构. 例如, 研究者采用同轴喷丝头, 将壳层的氧化石墨烯液晶与芯层的HCl溶液同步注入抗坏血酸/HCl溶液中, 制得中空氧化石墨烯水凝胶纤维, 随后经化学还原和超临界干燥后, 得到中空石墨烯胶体气凝胶纤维^[46].

在高速湿法纺丝方面, 研究者发展了离心纺丝技术和气流纺丝技术. 在离心纺丝技术中, 纺丝系统由一个侧壁含有毫米级出口的圆柱形喷丝板、一个转速可调的电机以及置于圆柱形容器内的凝固浴组成. 如图3(c)所示, 离心纺丝时, 纺丝液在离心力作用下由喷丝板出口挤出形成均匀连续的溶胶纤维, 其快速穿过空气进入凝固浴发生动态溶胶凝胶转变, 形成凝胶纤维^[51,53]. 凝固浴在十字形磁力搅拌器带动下旋转, 同时将凝胶纤维收集. 借助离心力作用, 该技术纺丝速率可高达700 m/min. 收集的凝胶纤维再经溶剂置换和冷冻干燥, 得到相应的胶体气凝胶纤维. 与基于注射泵辅助挤出的湿纺胶体气凝胶纤维相比, 离心纺丝胶体气凝胶纤维直径更细. 利用离心纺丝策略, 已成功实现了芳

纶胶体气凝胶纤维的快速制备, 纤维直径可通过纺丝液的流变性能和转速来调节. 不同于离心纺丝技术, 气流纺丝技术是在高速气流和低速液流的气液耦合作用下, 纺丝液随着飞行速度的增加被拉伸形成超细的溶胶纤维^[50]. 气流纺丝系统包括圆柱形纺丝液储罐、气液双通道同轴针头、接收和转移凝胶纤维的输送机、凝固浴池和收集器等. 如图3(d)所示, 剪切变稀性能使纺丝浆料被气流剪切时处于低黏度状态, 容易形成泰勒锥, 而在输送带上不受剪切处于高黏度状态而容易保持纤维的形貌^[50]. 利用该新型气流纺丝策略制备芳纶胶体气凝胶纤维, 其纺丝速度可达300~700 m/s, 是目前气凝胶纤维制备速度的最高值, 与工业上纤维制备速度(200~1000 m/s)相当. 可见, 离心纺丝和气流纺丝技术借助离心力或者高压空气实现纺丝液的挤出拉伸, 在凝固浴中发生动态溶胶凝胶转变, 实现了胶体气凝胶纤维的高速制备, 为直接获得胶体气凝胶纤维长纤/织物提供了高效的技术手段.

2.2 卷对卷制备胶体气凝胶薄膜

卷对卷是实现胶体气凝胶薄膜连续化、规模化生产的有效成型工艺. 与胶体气凝胶纤维的成型类似, 该工艺通常将胶体分散液通过刮刀或狭缝涂布头均匀涂

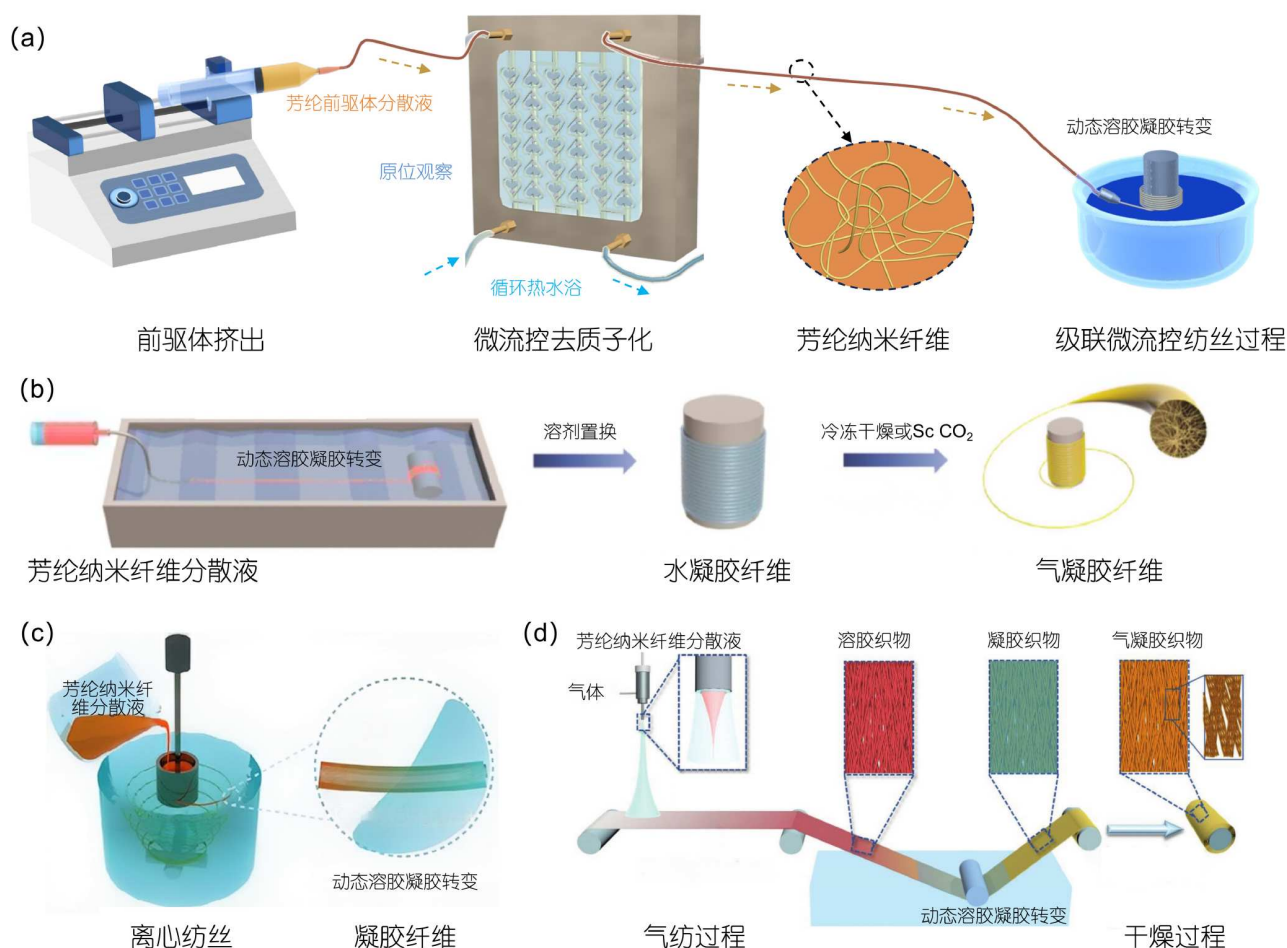


图3 湿法纺丝制备胶体气凝胶纤维。(a) 级联微流控湿法纺丝技术^[49]；(b) 注射泵辅助挤出技术^[36]；(c) 离心纺丝技术^[51]；(d) 气流纺丝技术^[50]
 Figure 3 Wet-spinning for fabricating colloidal aerogel fibers. (a) Cascade-microfluidic wet-spinning technology^[49]；(b) injection pump-assisted extrusion technology^[36]；(c) centrifugal spinning technology^[51]；(d) gas-blows-liquid spinning technology^[50]

覆在移动的基底(如金属箔、聚合物薄膜或无纺布)上,随后进入凝固浴中进行动态溶胶凝胶转变,再经溶剂置换、干燥,实现胶体气凝胶薄膜的连续生产^[37,52]。该工艺的关键在于涂布均匀性、凝胶化速度与生产线移动速度的匹配。

研究者先后发展了基布辅助卷对卷策略和电场辅助卷对卷策略来制备芳纶胶体气凝胶薄膜。如图4(a)所示,基布辅助卷对卷策略是将芳纶纳米纤维/聚乙烯吡咯烷酮分散液涂覆于基布,随后浸入凝固浴中诱导其凝胶化,最后通过卷对卷收集和特种干燥,得到连续化的多级孔芳纶/聚乙烯吡咯烷酮胶体气凝胶薄膜^[37]。电场辅助卷对卷策略是指电场驱动带负电的芳纶纳米纤维定向迁移,同时利用阳极辊筒处二甲亚砆分解产生的 H^+ 诱导纳米纤维质子化,凝胶后的薄膜在阳极辊筒

上收集成卷^[52],如图4(b)所示。采用该策略已实现了长度超过20 m的连续芳纶胶体气凝胶薄膜制备。此外,该策略利用电场实现了纳米纤维的取向排列,所得胶体气凝胶薄膜的力学性能也显著增强。

2.3 湿法3D打印制备胶体气凝胶块体

湿法3D打印制备胶体气凝胶通常是指将胶体分散液以预先设定的图案进行连续喷射或挤出的同时,原位发生动态溶胶凝胶转变,成型后的凝胶再经溶剂置换和干燥,得到具有目标形状的胶体气凝胶块体^[2]。湿法3D打印制备胶体气凝胶过程的关键在于如何在打印过程中使墨水快速凝胶化以保持形状,同时又保证层间良好结合^[54,55]。根据动态溶胶凝胶转变过程中是否有化学键的形成,湿法3D打印可分为物理湿法3D打印

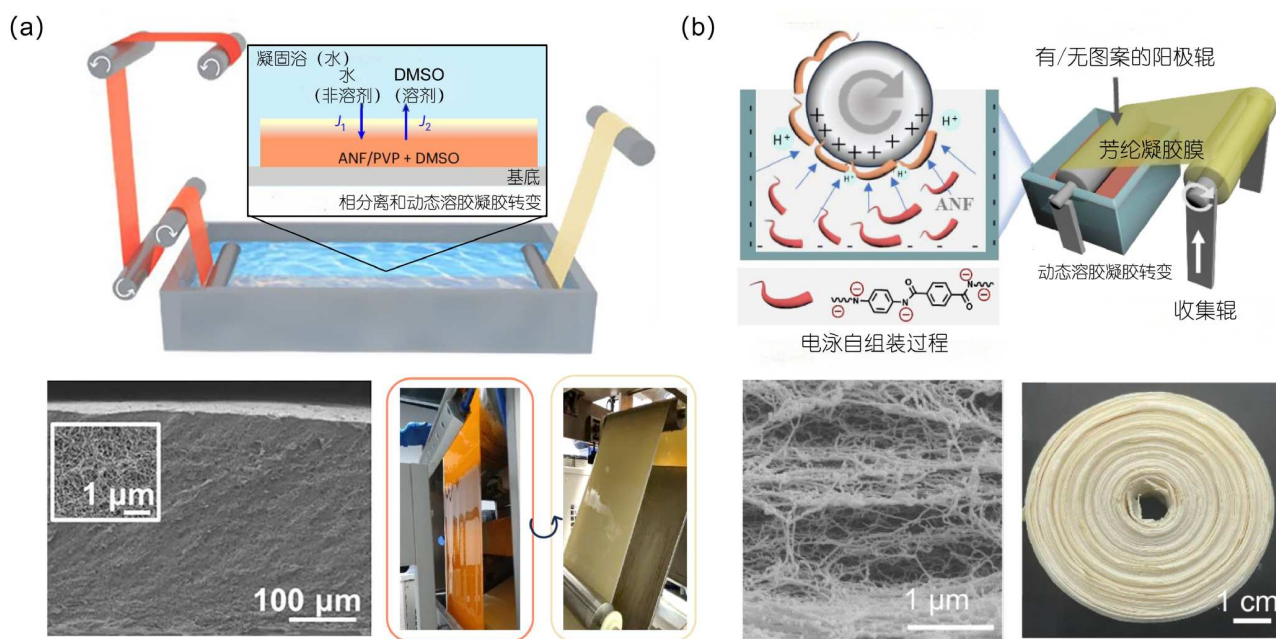


图4 卷对卷制备胶体气凝胶薄膜。(a) 基布辅助卷对卷策略^[37]；(b) 电场辅助卷对卷策略^[52]

Figure 4 Roll-to-roll processing for fabricating colloidal aerogel films. (a) Fabric-assisted roll-to-roll strategy^[37]; (b) electric field-assisted roll-to-roll strategy^[52]

和化学湿法3D打印。

在物理湿法3D打印过程中，胶体分散液在 π - π 堆叠、静电相互作用或范德华力作用下发生动态物理溶胶凝胶转变。研究者采用该策略，相继发展了冷台辅助3D打印工艺^[39,56](图5(a))、干冰辅助3D打印工艺^[40]以及级联微流控3D打印工艺^[49](图5(b))来定制具有特定结构的芳纶胶体气凝胶块体。例如，在冷台辅助3D打印工艺中，芳纶纳米纤维分散液通过气泵从注射器针头挤到低温平台上，分散液在挤出的同时发生溶胶-冻凝胶的转变^[39]。相较于传统的空气中直接挤出成型工艺^[57,58]，冷台辅助3D打印工艺具有更高的打印分辨率、更快的打印速率以及更低的流变性能要求。更重要的是，当新挤出的温度较高的分散液沉积于已冷冻层之上时，会轻微融化已冷冻层，随后在低温环境中共同再发生溶胶-冻凝胶转变，最终使得相邻打印线条之间呈焊接状态，保证了整体结构的完整性。此外，发展的干冰辅助3D打印工艺，利用干冰升华营造超低温环境，冷源的能量传递效率更高，可以进一步提高芳纶胶体气凝胶的打印高度^[40]。进一步，研究者发展了微流控3D打印技术，将墨水微流控质子化与墨水微流控加工集为一体，使得在高效连续生产芳纶纳米纤维分散液的同时，实现了其连续成型^[49]。

化学湿法3D打印工艺也已应用于芳纶胶体气凝胶的成型，该工艺中的凝胶过程通常涉及氢键、配位键及共价键。例如，如图5(c)所示，研究者发展了一种悬浮基质辅助3D打印技术，将芳纶纳米纤维分散液直接打印到具有触变性的微凝胶支撑浴中^[17]。支撑浴可为打印的线条提供临时的物理支撑，防止其在重力作用下塌陷，同时支撑浴中的质子可缓慢扩散至打印线条内部，诱导其凝胶化。该技术解决了当前直写成型技术打印速度慢、对墨水流变性能要求严苛、样件维度受限等不足，也适用于其他功能纳米构筑单元(如氧化石墨烯、MXene、纤维素等)三维立体胶体气凝胶样件的增材制造。此外，将打印机针头改为同轴针头，使芯层和壳层分别挤出前驱体分散液和凝胶因子，也可实现胶体气凝胶的成型。例如，如图5(d)所示，研究者在同轴针头芯层挤出芳纶纳米纤维分散液，同时壳层挤出酯类凝胶剂，当两者在针头出口处混合时即可发生动态溶胶凝胶转变。该方法同样无需支撑浴，可直接打印出具有自支撑能力的三维结构^[26]。与物理湿法3D打印相比，化学湿法3D打印工艺不仅能够按需打印具有任意空间构型的胶体气凝胶，突破打印高度与维度的限制，还为对温度不敏感的分散液体系提供打印可行性。

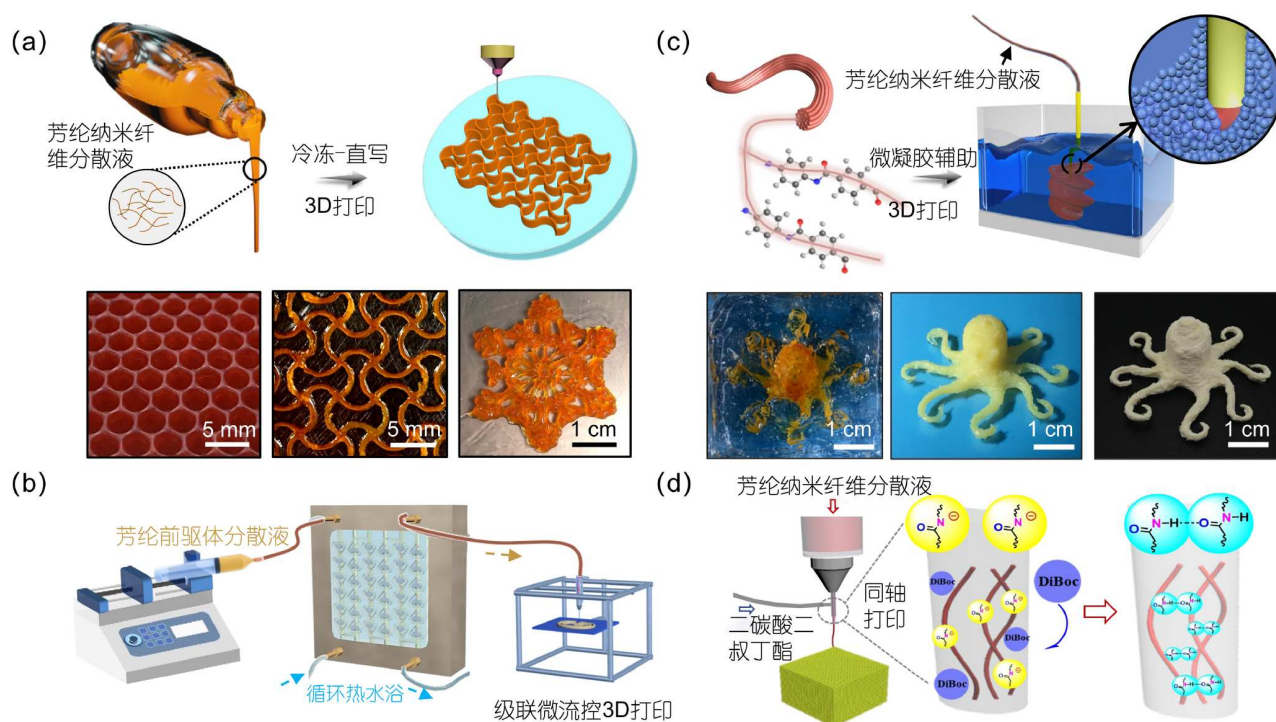


图5 湿法3D打印制备胶体气凝胶块体。(a) 冷冻-直写3D打印^[39]；(b) 级联微流控3D打印^[49]；(c) 微凝胶辅助3D打印^[17]；(d) 同轴打印^[26]
 Figure 5 Wet-3D printing for fabricating colloidal aerogel monoliths. (a) Cryo-3D printing^[39]；(b) cascade-microfluidic 3D printing^[49]；(c) microgel-assisted 3D printing^[17]；(d) coaxial printing^[26]

3 动态湿法成型胶体气凝胶的应用

动态湿法成型工艺所制备的胶体气凝胶，因其多样化的宏观形态(纤维、薄膜、3D结构)和可设计的微观结构(取向、多级孔等)，已在环境处理、能源存储与转换、电磁/力防护、热管理、生物医用等众多领域展现出卓越的应用性能。动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶性能及应用如表2所示。

3.1 环境处理

针对水相污染与资源回收，研究者通过湿法纺丝制备了聚脲胺脒/芳纶共型胶体气凝胶纤维，其中聚脲胺脒提供对铀酰离子的高选择性螯合位点，芳纶纳米纤维骨架则保证了纤维的力学强度和亲水性。该气凝胶纤维实现了对铀的最大吸附容量262.5 mg/g及良好的循环再生性能，为从海水中经济高效提铀提供了新思路^[41]。进一步地，研究者组装了中空石墨烯胶体气凝胶纤维阵列并嵌入PDMS基质中，利用中空通道模拟植物蒸腾作用以实现高效水分输送，同时多孔气凝胶壁作为太阳能吸收体展现高光热转换效率，在1个太阳光

照下水蒸发速率高达3.29 kg/(m² h)，且在处理高浓度盐水时展现出优异的抗盐结晶性能^[46]。此外，针对油水混合物分离，如图6(a)所示，研究者在卷对卷制备的聚乙烯吡咯烷酮/芳纶胶体气凝胶薄膜中选择性原位限域水相构建了固液复合膜，在乳化模式下，固液复合膜可形成粒径大小可调、均匀、稳定的乳液；在破乳模式中，固液复合膜可实现高效的油水分离，分离效率>99.97%，并兼具优异的抗污能力和循环稳定性^[37]。

针对气相污染物的吸附与去除，动态湿法成型同样展现了独特优势。例如，研究者通过离心纺丝制备的芳纶胶体气凝胶纤维毡具有超低密度(6.37 mg/cm³)和高孔隙率的特点，当用于吸附挥发性有机化合物时，其中的大孔能够作为挥发性有机化合物的扩散通道，而介孔可作为吸附挥发性有机化合物的活性位点。在高速气流下，吸附量高达438.0 mg/g，是相同条件下活性炭的2倍^[51]。进一步，研究者将具有高碘亲和性的液体四乙烯胺纳米限域在离心纺丝制备的带状芳纶胶体气凝胶纤维中，同时保持纤维间的宏观孔隙开放。这种设计使碘与功能液体的接触面积最大化，实现了高碘吸附容量(6837 mg/g)和高达56.7%的液体利用率，远超

表 2 动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶性能及应用

Table 2 Properties and application of colloidal aerogels prepared by dynamic wet-forming process

材料体系	密度 (mg/cm ³)	比表面积 (m ² /g)	力学性能	热导率/电导率	代表性应用	文献
级联微流控纺丝芳纶胶体气凝胶纤维	26.7	261	断裂强度 2.5 MPa	—	保温隔热	[49]
注射泵辅助挤出纺丝芳纶胶体气凝胶纤维	23	240	断裂强度 3.3 MPa	0.037 W/(m K)	保温隔热/信息加密	[36,47]
注射泵辅助挤出纺丝MXene胶体气凝胶纤维	35~181	65~142	断裂强度 1.1 MPa	11170 S/m	电热/光热响应	[31]
注射泵辅助挤出纺丝石墨烯胶体气凝胶纤维	—	548	断裂强度 1.45 MPa	~10 ³ S/m	相变智能纤维	[18]
注射泵辅助挤出纺丝打孔石墨烯胶体气凝胶纤维	230	356.3	断裂强度 0.77~1.03 MPa	146.77~211.69 S/m	吸湿/制冷制热/微波吸收	[45]
离心纺丝芳纶胶体气凝胶纤维	6.37(聚集体)	313	断裂强度 12.48 MPa	—	污染物吸附	[51,53]
气流纺丝芳纶胶体气凝胶纤维	—	180	拉伸强度 58.7 MPa	0.035 W/(m K)	止血	[50]
基布辅助卷对卷芳纶/PVP胶体气凝胶薄膜	—	—	断裂强度 2.1 MPa	—	油水分离/乳化	[37]
电场辅助芳纶胶体气凝胶薄膜	21.2	234	断裂强度12 MPa	0.037~ 0.046 W/(m K)	大面积薄膜、质子传导	[52]
冷台辅助3D打印芳纶胶体气凝胶	11.9	350	断裂强度66 kPa	—	电池低温保护罩	[39]
干冰辅助3D打印芳纶胶体气凝胶	11.9	333.18	负载剪切变硬凝胶 能量吸收 176 J/g	—	智能抗冲击蜂窝	[40]
悬浮基质辅助3D打印芳纶胶体气凝胶	36.5	230.2	—	0.0279 W/(m K)	保温隔热	[17]
同轴打印芳纶胶体气凝胶	33~165	360~404	压缩模量52 MPa	0.027~0.05 W/(m K)	保温隔热	[26]

传统液体吸收剂和固体吸附剂，为碘的高效捕获提供了新思路^[53]。由此可见，中空纤维结构可同时保障高效物质传输与光热转换，大孔-介孔分级结构则可实现高气体通量与高吸附容量的协同，这些案例揭示了动态湿法成型通过调控孔隙拓扑与纳米空间约束，能够有效兼顾环境修复中的吸附速度与吸附量。

3.2 能源存储与转换

动态湿法成型制备的胶体气凝胶材料通过引入相变材料实现了热能的存储与按需释放，并进一步拓展出多刺激响应功能。例如，研究者将湿法纺丝制得的石墨烯胶体气凝胶纤维、相变材料及超疏水涂层巧妙复合，得到一种柔性、自清洁的石墨烯胶体气凝胶智能相变纤维。该纤维具有可调的相变焓值(0~186 J/g)，且在多重刺激响应(光、电、温度)下展现出热能转换与存储/释放功能，在新一代智能可穿戴织物及便携式电子器件领域具有广阔应用前景^[18]。

在此基础上，通过精细调控纤维的结构参数，研究者进一步赋予了相变纤维形状记忆功能。例如，如图6(b)所示，研究者通过调节湿法纺丝针头尺寸，制备了不同

直径的疏水芳纶胶体气凝胶纤维，并将其浸渍石蜡得到相变纤维。研究发现，当纤维直径小于91 μm时，其弯曲刚度较低，可编织成舒适的智能调温织物；而当直径大于91 μm时，纤维在室温下具有高刚度，能够稳定临时形状，一旦温度升高至石蜡熔点以上，纤维便恢复柔韧并回复至初始形状。基于这一特性设计的智能抓手可在低温刚性状态下抓取物体，加热后柔性释放，成功实现了形状记忆驱动的抓取与释放功能，为智能执行器和软体机器人提供了新型材料平台^[43]。湿法纺丝中的高倍牵伸促使石墨烯片沿纤维轴向高度取向，赋予了相变纤维快速的电/光/热响应；而基于不同直径的弯曲刚度调控策略，实现了相变纤维的力学行为与温度响应的耦合，这些案例证明了动态湿法成型不仅是胶体气凝胶形状赋予手段，更是实现多场响应的结构设计平台。

3.3 电磁/力防护

在电磁防护领域，动态湿法成型制备的气凝胶纤维通过引入导电、磁性及吸湿组分，实现了从电磁屏蔽到微波吸收乃至多功能一体化的性能提升。例如，研

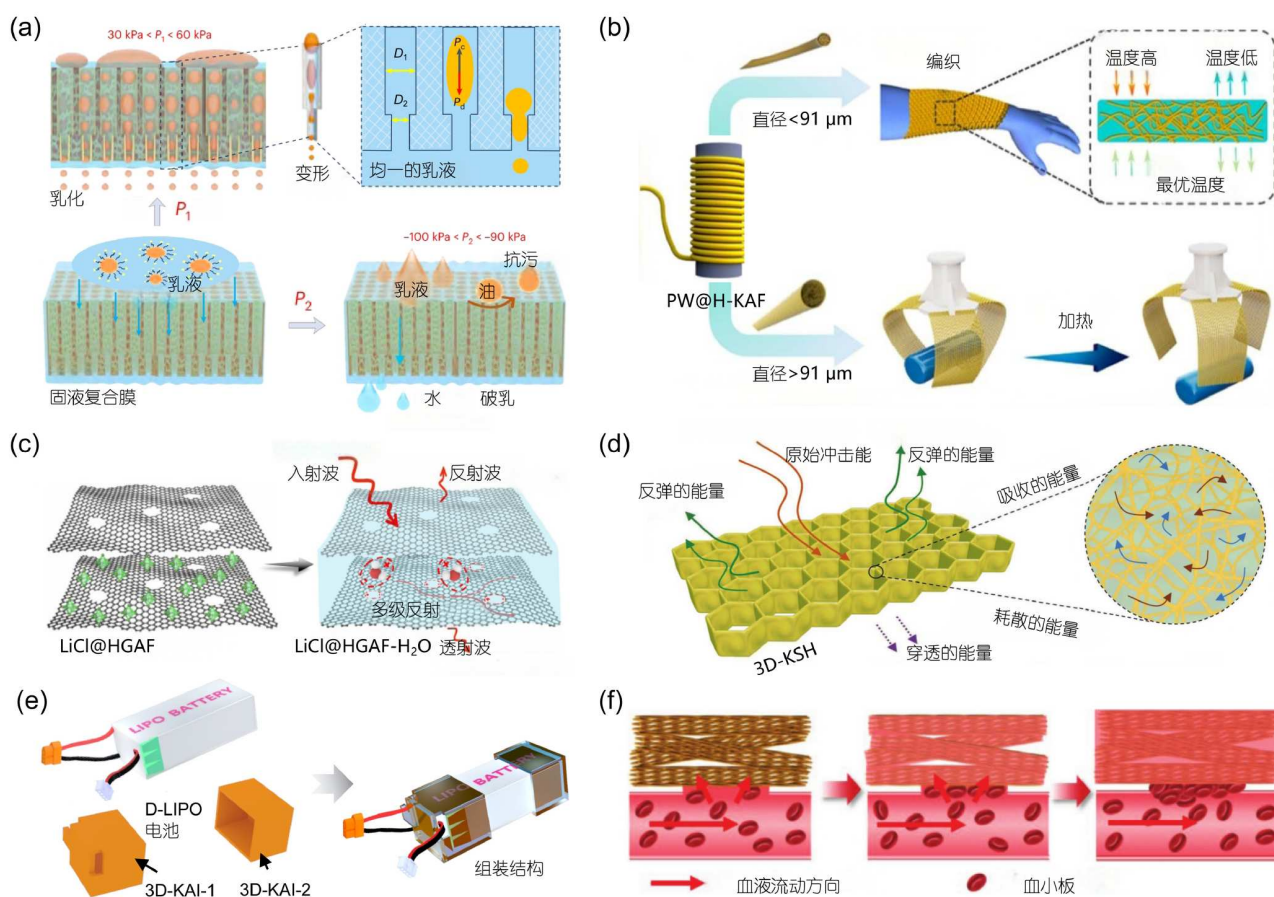


图6 动态湿法成型胶体气凝胶的应用。(a) 聚乙烯吡咯烷酮/芳纶胶体气凝胶薄膜固液复合膜的膜乳化和膜分离^[37]；(b) 弯曲刚度导向的芳纶胶体气凝胶基智能调温织物和形状记忆抓手^[43]；(c) 吸湿打孔石墨烯胶体气凝胶纤维用于微波吸收^[45]；(d) 3D打印芳纶胶体气凝胶基智能抗冲击蜂窝^[40]；(e) 3D打印芳纶胶体气凝胶电池保护罩^[17]；(f) 气流纺丝芳纶胶体气凝胶止血织物^[50]

Figure 6 Applications of colloidal aerogels fabricated by dynamic wet-forming processes. (a) Schematic illustration of membrane emulsification and membrane separation based on a polyvinylpyrrolidone/aramid colloidal aerogel film-derived solid-liquid composite membrane^[37]; (b) bending stiffness-directed aramid colloidal aerogel-based smart thermoregulating fabric and shape memory gripper^[43]; (c) hygroscopic holey graphene colloidal aerogel fibers for microwave absorption^[45]; (d) 3D printed aramid colloidal aerogel-based smart impact-resistant honeycomb^[40]; (e) 3D printed aramid colloidal aerogel battery protective cover^[17]; (f) aramid colloidal aerogel hemostatic fabric fabricated by gas-blows-liquid spinning strategy^[50]

研究者通过湿法纺丝制备了石墨烯胶体气凝胶纤维，再经化学镀镍均匀负载镍纳米粒子，获得了具有优异导电性(4.5×10^4 S/m)的石墨烯/镍胶体气凝胶纤维。该纤维在5 V低电压下即可达到174°C的快速电热响应，同时在12.5~20 GHz频段内具有超过30 dB的电磁屏蔽效能^[42]。进一步，研究者将碳纳米管、Fe₃O₄磁性纳米粒子与芳纶纳米纤维共混，通过湿法纺丝和高温碳化制备了轻质(0.12 g/cm³)的碳纳米管/Fe₃O₄/芳纶胶体气凝胶纤维。碳化处理显著增强了导电损耗与界面极化，优化了阻抗匹配，使纤维在Ku波段(12~18 GHz)实现了全频段有效吸收(反射损耗RL<-10 dB)，最小RL低至-59 dB，在新型隐身领域中展现出独特潜力^[48]。此外，

如图6(c)所示，研究者先制备了打孔石墨烯胶体气凝胶纤维，再负载吸湿盐氯化锂得到复合纤维。该纤维能高效捕获空气中的水蒸气(吸附容量4.15 g/g)，且吸附水后形成的盐水溶液极大地增强了介电损耗，在8.3~18 GHz宽频带内具有优异的微波吸收性能，为设计集吸湿、热调控与微波吸收于一体的多功能气凝胶纤维开辟了新路径^[45]。

在力学防护方面，如图6(d)所示，研究者利用干冰辅助3D打印技术，制备了芳纶胶体气凝胶蜂窝结构，并将其作为骨架选择性限域剪切变硬凝胶，获得了智能能量吸收蜂窝。该蜂窝具有独特的应变率敏感特性，在高应变率冲击(6300 s⁻¹)下的能量吸收值高达176 J/g，

且应变率敏感性系数达 4.16×10^{-4} , 性能超越现有大多数防护材料^[40]. 功能纳米粒子在三维导电网络上的均匀负载, 实现了导电损耗与磁损耗的协同; 宏观结构与功能凝胶的复合, 实现了高的能量吸收和应变率敏感性. 可见, 动态湿法成型能够通过组分-结构-工艺一体化设计, 赋予气凝胶良好的电磁/力防护能力.

3.4 热管理

通过湿法纺丝制备的芳纶胶体气凝胶纤维具有三维连续的网络结构, 比表面积高达 $240 \text{ m}^2/\text{g}$, 孔隙率高达98%, 热导率低至 $0.037 \text{ W}/(\text{m K})$, 且柔韧性好, 可编织成织物. 与棉布相比, 芳纶胶体气凝胶织物在极端高温(300°C)和低温(-196°C)环境下均表现出更优异的保温隔热性能^[36]. 此外, 该气凝胶纤维也可以通过填充相变材料制备成空调纤维, 其热焓值可达 162 J/g , 远超现有商用Outlast空调纤维的热焓值. 除胶体气凝胶纤维外, 采用湿法3D打印工艺可为无人机锂电池量身定制具有复杂形状的芳纶胶体气凝胶保温罩. 如图6(e)所示, 在 -30°C 的寒冷环境下, 裸电池的放电容量大幅下降, 而负载有气凝胶保温罩的电池, 其放电容量可提升约26%, 有效确保了无人机在恶劣环境下的正常工作^[17]. 通过宏观形态控制, 超隔热的胶体气凝胶不但可以设计成可穿戴织物, 还可以适配形状复杂的曲面, 拓展了胶体气凝胶在热管理领域的应用.

3.5 生物医用

胶体气凝胶织物高的孔隙率和可调的孔径分布, 赋予其优异的吸水性和微粒阻隔性, 有望用于伤口的高效止血. 基于此, 如图6(f)所示, 研究者通过离心纺丝制备芳纶胶体气凝胶织物, 利用其超高的亲水性和比表面积, 可快速吸收伤口血液中的水分, 浓缩血小板和凝血因子, 加速凝血过程. 动物实验表明, 其止血时间为120 s, 失血量为1.2 g, 均显著优于商用纱布和棉球^[50]. 这一案例表明, 动态湿法成型能够通过调控纤维直径、堆积密度及表面润湿性, 构建便携式、高效止

血材料, 为新一代战场急救、灾害救援及日常手术用止血敷料的设计提供了新思路.

4 总结与展望

动态湿法成型工艺从根本上改变了气凝胶材料的制造范式, 使其从静态、低效、形态单一的制备方式, 迈向动态、连续、结构可编程的先进制造模式. 通过湿法纺丝、卷对卷成型和湿法3D打印技术, 研究者已成功制备出多种胶体气凝胶纤维、薄膜和复杂三维块体, 并在多个领域展示了广阔的应用前景. 然而, 该领域仍处于快速发展阶段, 未来研究可从以下几个方面深入: (1) 跨尺度结构的精细编程. 现有技术已能实现宏观形态(纤维、薄膜、复杂三维块体)和微观结构(取向、多级孔)的初步控制. 未来应致力于实现从分子尺度、纳米尺度、微米尺度到宏观尺度的跨尺度精确协同调控^[59]. (2) 规模化制造与应用转化. 尽管湿法纺丝、卷对卷法已实现实验室规模的小批量连续生产, 但距离真正的工业化应用仍存在显著差距. 发展常压干燥技术或与在线溶剂置换相集成的连续干燥技术、发展高效低能耗的绿色溶剂循环使用策略、开发适用于生产线上的实时监测技术、建立系统可靠的标准化性能评价方法, 是推动胶体气凝胶从“能成型”迈向“连续、稳定、低成本、高一致性”工业化制造亟待解决的关键工程问题. (3) 气凝胶的可持续发展. 目前动态湿法成型多集中于芳纶、石墨烯等少数体系, 这些气凝胶的原料和制备过程成本较高. 借鉴竹基梯度气凝胶^[60]、3D打印仿木结构纤维素气凝胶^[61], 以及木基气凝胶^[62]等成功案例, 发展生物质材料及其衍生物的动态湿法成型工艺, 以及开发可循环利用的动态成型策略以降低胶体气凝胶的原料和制备过程成本^[63], 对于推动气凝胶材料的绿色、可持续发展具有重要意义.

总之, 动态湿法成型工艺为胶体气凝胶的设计与制造开辟了新的天地. 随着对溶胶-凝胶转变热/动力学、流体力学及材料科学的深入理解, 以及先进制造技术的不断融合, 胶体气凝胶材料将在更多战略性新兴产业领域发挥关键作用.

参考文献

- Sheng Z, Zhang X. Mimicking polar bear hairs in aerogel fibers. *Science*, 2023, 382: 1358–1359
- Cheng Q, Sheng Z, Ding Y, et al. 3D printed colloidal aerogels: principle, process, performance, and perspective. *Prog Mater Sci*, 2025, 152: 101456
- Lyu J, Li L, Zhang X. Nanoporous aramid colloidal aerogels: design, fabrication, and performance. *Prog Polym Sci*, 2025, 163: 101945

- 4 Guo J, Fu S, Deng Y, et al. Hypocrystalline ceramic aerogels for thermal insulation at extreme conditions. *Nature*, 2022, 606: 909–916
- 5 Zhao S, Siqueira G, Drdova S, et al. Additive manufacturing of silica aerogels. *Nature*, 2020, 584: 387–392
- 6 Wu M, Shao Z, Zhao N, et al. Biomimetic, knittable aerogel fiber for thermal insulation textile. *Science*, 2023, 382: 1379–1383
- 7 Xu X, Zhang Q, Hao M, et al. Double-negative-index ceramic aerogels for thermal superinsulation. *Science*, 2019, 363: 723–727
- 8 Sheng Z, Liu Z, Hou Y, et al. The rising aerogel fibers: status, challenges, and opportunities. *Adv Sci*, 2023, 10: 2205762
- 9 Yao B, Chandrasekaran S, Zhang H, et al. 3D-printed structure boosts the kinetics and intrinsic capacitance of pseudocapacitive graphene aerogels. *Adv Mater*, 2020, 32: 1906652
- 10 Liu H, Zhang X, Liao Y, et al. Building-envelope-inspired, thermomechanically robust all-fiber ceramic meta-aerogel for temperature-controlled dominant infrared camouflage. *Adv Mater*, 2024, 36: 2313720
- 11 Ji X, Du Y, Zhang X. Elaborate size-tuning of silica aerogel building blocks enables laser-driven lighting. *Adv Mater*, 2021, 34: 2107168
- 12 Chen L, Li L, Zhang X. Solvent-regulable interfacial groups enable on-demand superhydrophobic/superhydrophilic silica aerogels. *Nat Commun*, 2025, 16: 2228
- 13 Li G, Zhu M, Gong W, et al. Boron nitride aerogels with super-flexibility ranging from liquid nitrogen temperature to 1000°C. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1900188
- 14 Wang B, Li G, Xu L, et al. Nanoporous boron nitride aerogel film and its smart composite with phase change materials. *ACS Nano*, 2020, 14: 16590–16599
- 15 Du Y, Zhang X, Wang J, et al. Reaction-spun transparent silica aerogel fibers. *ACS Nano*, 2020, 14: 11919–11928
- 16 Chen J, Li L, Zhang A, et al. Solubility-pKa coupling effect tailored nanoporous nylon aerogel family with multiple thermomechanical processes. *Adv Mater*, 2025, 38: e10031
- 17 Cheng Q, Sheng Z, Wang Y, et al. General suspended printing strategy toward programmatically spatial Kevlar aerogels. *ACS Nano*, 2022, 16: 4905–4916
- 18 Li G, Hong G, Dong D, et al. Multiresponsive graphene-aerogel-directed phase-change smart fibers. *Adv Mater*, 2018, 30: 1801754
- 19 Zhao S, Malfait W J, Guerrero-Alburquerque N, et al. Biopolymer aerogels and foams: chemistry, properties, and applications. *Angew Chem Int Ed*, 2018, 57: 7580–7608
- 20 Feng J, Su B L, Xia H, et al. Printed aerogels: chemistry, processing, and applications. *Chem Soc Rev*, 2021, 50: 3842–3888
- 21 Qiao J, Song Q, Xuan L, et al. Dual cross-linked magnetic MXene aerogel with high strength and durability enables multifunctionality. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2401687
- 22 Li X, Dong G, Liu Z, et al. Polyimide aerogel fibers with superior flame resistance, strength, hydrophobicity, and flexibility made via a universal sol–gel confined transition strategy. *ACS Nano*, 2021, 15: 4759–4768
- 23 Hu P, Lyu J, Fu C, et al. Multifunctional aramid nanofiber/carbon nanotube hybrid aerogel films. *ACS Nano*, 2019, 14: 688–697
- 24 Lyu J, Liu Z, Wu X, et al. Nanofibrous Kevlar aerogel films and their phase-change composites for highly efficient infrared stealth. *ACS Nano*, 2019, 13: 2236–2245
- 25 Lyu J, Sheng Z, Xu Y, et al. Nanoporous Kevlar aerogel confined phase change fluids enable super-flexible thermal diodes. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2200137
- 26 Li L, Lyu J, Cheng Q, et al. Versatile recyclable Kevlar nanofibrous aerogels enabled by destabilizing dynamic balance strategy. *Adv Fiber Mater*, 2023, 5: 1050–1062
- 27 Li L, Yang G, Lyu J, et al. Folk arts-inspired twice-coagulated configuration-editable tough aerogels enabled by transformable gel precursors. *Nat Commun*, 2023, 14: 8450
- 28 Xue T, Zhu C, Yu D, et al. Fast and scalable production of crosslinked polyimide aerogel fibers for ultrathin thermoregulating clothes. *Nat Commun*, 2023, 14: 8378
- 29 Yang Y, Lyu J, Chen J, et al. Flame-retardant host–guest films for efficient thermal management of cryogenic devices. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2102232
- 30 He H, Wei X, Yang B, et al. Ultrastrong and multifunctional aerogels with hyperconnective network of composite polymeric nanofibers. *Nat Commun*, 2022, 13: 4242
- 31 Li Y, Zhang X. Electrically conductive, optically responsive, and highly orientated $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene aerogel fibers. *Adv Funct Mater*, 2021, 32: 2107767
- 32 Fu C, Sheng Z, Zhang X. Laminated structural engineering strategy toward carbon nanotube-based aerogel films. *ACS Nano*, 2022, 16: 9378–9388
- 33 Hou Y, Sheng Z, Zhang M, et al. Hierarchically porous carbon colloidal aerogels for highly efficient flow cells. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2418721
- 34 Li G, Dong D, Hong G, et al. High-efficiency cryo-thermocells assembled with anisotropic holey graphene aerogel electrodes and a eutectic redox electrolyte. *Adv Mater*, 2019, 31: 1901403

- 35 Wu F, Liu D, Li G, et al. Bayberry tannin directed assembly of a bifunctional graphene aerogel for simultaneous solar steam generation and marine uranium extraction. *Nanoscale*, 2021, 13: 5419–5428
- 36 Liu Z, Lyu J, Fang D, et al. Nanofibrous Kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments. *ACS Nano*, 2019, 13: 5703–5711
- 37 Wu T, Hou Y, Liu Z, et al. Liquid-infused aerogel membranes with reverse functions enable on-demand emulsification and demulsification. *Nat Water*, 2024, 2: 899–910
- 38 Hu Y, Yang G, Zhou J, et al. Proton donor-regulated mechanically robust aramid nanofiber aerogel membranes for high-temperature thermal insulation. *ACS Nano*, 2022, 16: 5984–5993
- 39 Cheng Q, Liu Y, Lyu J, et al. 3D printing-directed auxetic Kevlar aerogel architectures with multiple functionalization options. *J Mater Chem A*, 2020, 8: 14243–14253
- 40 Cheng Q, Lyu J, Shi N, et al. Smart energy-absorbing aerogel-based honeycombs with selectively nanoconfined shear-stiffening gel. *Small Meth*, 2023, 7: 2300002
- 41 Li J, Wang J, Wang W, et al. Symbiotic aerogel fibers made via *in-situ* gelation of aramid nanofibers with polyamidoxime for uranium extraction. *Molecules*, 2019, 24: 1821
- 42 Wu X, Hong G, Zhang X. Electroless plating of graphene aerogel fibers for electrothermal and electromagnetic applications. *Langmuir*, 2019, 35: 3814–3821
- 43 Bao Y, Lyu J, Liu Z, et al. Bending stiffness-directed fabricating of Kevlar aerogel-confined organic phase-change fibers. *ACS Nano*, 2021, 15: 15180–15190
- 44 Wang W, Gong W, Wang Y, et al. Electrokinetic effect and H₂O₂ boosting in synthetic graphene/ α -FeOOH aerogel films for the generation of electricity. *J Mater Chem A*, 2021, 9: 5588–5596
- 45 Hou Y, Sheng Z, Fu C, et al. Hygroscopic holey graphene aerogel fibers enable highly efficient moisture capture, heat allocation and microwave absorption. *Nat Commun*, 2022, 13: 1227
- 46 Li G, Fang D, Hong G, et al. Assembling graphene aerogel hollow fibres for solar steam generation. *Compos Commun*, 2022, 35: 101302
- 47 Liu Z, Lyu J, Ding Y, et al. Nanoscale Kevlar liquid crystal aerogel fibers. *ACS Nano*, 2022, 16: 15237–15248
- 48 Yuan R, Lyu J, Fu C, et al. Carbonized Kevlar nanofiber/carbon nanotube/magnetic nanoparticle hybrid aerogel fibers for microwave absorption. *ACS Appl Nano Mater*, 2023, 6: 10944–10952
- 49 Ding Y, Cheng Q, Lyu J, et al. Visible microfluidic deprotonation for aramid nanofibers as building blocks of cascade-microfluidic-processed colloidal aerogels. *Adv Mater*, 2024, 36: 2400101
- 50 Lyu J, Liu Z, Zhang X. Gas-blows-liquid spinning strategy toward mechanically strong, thermally protective, efficiently hemostatic aerogel fibers/fabrics. *Small Meth*, 2024, 8: 2301550
- 51 Wen Z, Lyu J, Ding Y, et al. Aerogel fibers made via generic sol-gel centrifugal spinning strategy enable dynamic removal of volatile organic compounds from high-flux gas. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2407221
- 52 Li L, Yin R, Sheng Z, et al. Electro-manipulating of negative-charged aramid nanofibers towards micro-to-macro scale colloidal aerogel films. *Nat Commun*, 2025, 16: 8663
- 53 Wei J, Yuan R, Ma J, et al. Design, fabrication, and iodine capture performance of Kevlar aerogel nano-confined liquid fibers. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: e12446
- 54 Sydney Gladman A, Matsumoto E A, Nuzzo R G, et al. Biomimetic 4D printing. *Nat Mater*, 2016, 15: 413–418
- 55 Zhu P, Yu Z, Sun H, et al. 3D printed cellulose nanofiber aerogel scaffold with hierarchical porous structures for fast solar-driven atmospheric water harvesting. *Adv Mater*, 2024, 36: 2306653
- 56 Liu C, Lyu J, Shi N, et al. Kevlar nanofibrous aerogel-based 3-layer tandem cloak enables highly efficient and long-lasting infrared stealth. *Chem Eng J*, 2023, 462: 142249
- 57 Guo F, Jiang Y, Xu Z, et al. Highly stretchable carbon aerogels. *Nat Commun*, 2018, 9: 881
- 58 Zhu C, Han T Y J, Duoss E B, et al. Highly compressible 3D periodic graphene aerogel microlattices. *Nat Commun*, 2015, 6: 6962
- 59 Shahriar S M S, McCarthy A D, Andrabi S M, et al. Mechanically resilient hybrid aerogels containing fibers of dual-scale sizes and knotty networks for tissue regeneration. *Nat Commun*, 2024, 15: 1080
- 60 Wang J, Huang C, Chen J, et al. A sustainable route toward gradient-structured sponge with topological cellular cavity from bamboo for all-season comfort. *Adv Funct Mater*, 2026, 36: e32182
- 61 Chen L, He S, Huang W, et al. 3D-printed tripodal porous wood-mimetic cellulosic composite evaporator for salt-free water desalination. *Compos Part B-Eng*, 2023, 263: 110830
- 62 Wu Y, Chen J, Xu C, et al. Wood-based and wood-inspired thermal management materials. *Chin J Chem*, 2025, 43: 1691–1706
- 63 Li M, Wu T, Zhao Z, et al. Multiscale manufacturing of recyclable polyimide composite aerogels. *Adv Mater*, 2025, 37: 2411599

Summary for “动态湿法成型工艺制备胶体气凝胶研究进展”

Research progress on the fabrication of colloidal aerogels by dynamic wet-forming processes

Qingqing Cheng¹ & Xuotong Zhang^{1,2*}¹ Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China² College of Materials & Chemical Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China* Corresponding author, E-mail: xtzhang2013@sinano.ac.cn

Aerogels are a class of three-dimensional nanoporous materials characterized by ultrahigh porosity, exceptionally large specific surface area, and extremely low thermal conductivity. Based on the precursor type and synthetic strategy, aerogels can be categorized into molecular aerogels and colloidal aerogels. The former are prepared from small-molecule precursors via polymerization reactions, and the latter are fabricated from nanoscale building blocks through a dispersion-stabilization-destabilization process. Colloidal aerogels not only make full use of existing nanoscale units but also overcome the limitation that materials lacking polymerization activity are difficult to process into aerogels. Conventional molecular aerogels, owing to the comparable diffusion rates between small-molecule gelators and small-molecule precursors, primarily rely on the static sol-gel transition, that is, the small molecule precursors remain stationary in the mold and slowly gel, making it difficult to achieve continuous production and the formation of complex structures. In contrast, the diffusion rate of nanoscale building blocks in colloidal aerogel precursors is much lower than that of small molecule gelators, enabling good compatibility with dynamic wet-forming processes such as wet spinning, roll-to-roll processing, and three-dimensional printing, where dynamic sol-gel transition occurs simultaneously with shaping. Dynamic wet-forming processes offer three major advantages: (1) high efficiency and continuity enabling kilometer-scale production, (2) structural controllability through external-field induction, and (3) geometric programmability for fabricating arbitrarily complex shapes.

This review first elucidates the fundamental differences between static and dynamic sol-gel transition strategies, and then focuses on the latest progress from our research group in fabricating colloidal aerogels via dynamic wet-forming processes, including wet-spun fibers, roll-to-roll films, and 3D-printed constructs. Owing to their diverse macroscopic morphologies and designable microstructures, colloidal aerogels fabricated by dynamic wet-forming processes have demonstrated excellent application performance in numerous fields such as environmental remediation, energy storage and conversion, electromagnetic and mechanical protection, thermal management, and biomedicine. Dynamic wet-forming processes have inaugurated a new paradigm for advanced aerogel manufacturing, shifting from static, inefficient production to dynamic, continuous, and structurally programmable fabrication. Future research can focus on the following aspects: (1) expansion of material systems. Current research on dynamic wet-forming processes is mostly concentrated on a few colloidal systems such as aramid, graphene, and cellulose. How to extend this strategy universally to the assembly of a broader range of functional nanoscale building blocks remains a key focus for future studies. (2) Fine programming of cross-scale structures. While existing technologies have achieved preliminary control over macroscopic morphologies and microstructures, future efforts should be devoted to achieving precise and synergistic regulation across molecular, nanoscale, microscale, and macroscopic dimensions. (3) Scale-up manufacturing and application translation. Although wet-spinning and roll-to-roll processes have been realized for small-scale continuous production, challenges such as achieving continuous drying, improving production stability, reducing costs, and enabling seamless transition from laboratory to industrial applications remain urgent issues to be resolved. (4) Sustainable development of aerogels. The raw materials and preparation processes for most high-performance aerogels are costly. Developing recyclable dynamic forming strategies is of great significance for promoting the green and sustainable development of aerogel materials.

In summary, dynamic wet-forming processes open up new horizons for the design and fabrication of colloidal aerogels. With deeper understanding of the thermo- and hydrodynamics of sol-gel transitions, fluid mechanics, and materials science, as well as the continuous integration of advanced manufacturing technologies, colloidal aerogel materials will play a key role in more strategically emerging fields.

aerogel, wet-spinning, roll-to-roll processing, 3D printing, dynamic sol-gel transitiondoi: [10.1360/CSB-2026-0554](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0554)