

超临界干燥技术制备气凝胶的研究进展

李谨艺, 白如玉, 张菲菲, 鲁建鹏

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年4月26日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

气凝胶作为一种具有高孔隙率、高比表面积和超低密度的固体材料, 在隔热隔音、能量存储、环境净化、生物医学等领域展现出广阔的应用前景。超临界干燥是制备高性能气凝胶的关键步骤, 其通过消除气-液相界面的表面张力, 能够完美保留湿凝胶的纳米多孔结构。本文系统综述了超临界干燥技术的基本原理、工艺方法、参数优化策略及其在不同类型气凝胶制备中的应用。文章首先阐述了超临界干燥的热力学基础和传质机理, 随后详细介绍了高温超临界干燥和低温超临界二氧化碳干燥两种主要工艺路线, 重点分析了温度、压力、流速和卸压速率等工艺参数对干燥效果的影响。在此基础上, 比较了超临界干燥与冷冻干燥、常压干燥的优缺点, 并探讨了该技术在二氧化硅气凝胶、有机聚合物气凝胶、生物基气凝胶及复合气凝胶制备中的适用性。最后, 针对当前超临界干燥工艺成本高、效率低等挑战, 提出了过程强化、连续化生产和绿色化发展的未来方向, 以期为高性能气凝胶的产业化制备提供理论参考。

关键词

超临界干燥, 气凝胶, 二氧化碳超临界流体, 溶胶-凝胶, 纳米多孔结构

Research Progress of Aerogels Prepared by Supercritical Drying Technology

Jinyi Li, Ruyu Bai, Feifei Zhang, Jianpeng Lu

College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: April 6, 2026; accepted: April 26, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

As a solid material with high porosity, high specific surface area and ultra-low density, aerogels have shown broad application prospects in the fields of thermal insulation, sound insulation, energy storage, environmental purification, and biomedicine. Supercritical drying is a key step in the preparation of high-performance aerogels. By eliminating the surface tension of the gas-liquid interface,

it can perfectly retain the nanoporous structure of the wet gel. This paper systematically reviews the basic principles, process methods, parameter optimization strategies of supercritical drying technology and its application in the preparation of different types of aerogels. Firstly, the thermodynamic basis and mass transfer mechanism of supercritical drying are expounded. Then, two main process routes of high temperature supercritical drying and low temperature supercritical carbon dioxide drying are introduced in detail. The effects of process parameters such as temperature, pressure, flow rate and pressure relief rate on drying effect are analyzed emphatically. On this basis, the advantages and disadvantages of supercritical drying, freeze drying and atmospheric pressure drying were compared, and the applicability of this technology in the preparation of silica aerogels, organic polymer aerogels, bio-based aerogels and composite aerogels was discussed. Finally, in view of the challenges of high cost and low efficiency of the current supercritical drying process, the future directions of process intensification, continuous production and green development are proposed, in order to provide a theoretical reference for the industrial preparation of high-performance aerogels.

Keywords

Supercritical Drying, Aerogel, Supercritical Carbon Dioxide Fluid, Sol-Gel, Nanoporous Structure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气凝胶是一种由纳米尺度的固体骨架和填充于其间的大量气体构成的特殊材料，具有高孔隙率、高比表面积和超低密度等独特性能。这些特性使其在多个领域展现出广阔的应用前景：在建筑和航空航天领域，气凝胶可用作高效的隔音和隔热材料[1][2]；在能源领域，可用于能量存储器件[3]；在环境领域，可作为气体吸附剂和水净化材料[4]；在生物医学领域，还可用于快速体内平衡和伤口愈合[5][6]。目前，气凝胶已在世界范围内以工业规模制造，并主要用作高效隔热材料[7]。

气凝胶的制备通常包含三个主要阶段：凝胶制备、干燥准备和干燥过程。首先通过溶胶-凝胶化学形成湿凝胶，这是一种固体、高度多孔的基质，其孔隙中充满溶剂[8]。随后，需要采用特殊的干燥技术去除孔隙内的液体，同时保持固体骨架不被破坏。干燥是气凝胶制造中最关键也最具挑战性的步骤，因为孔隙内的毛细压力可能导致网络结构坍塌[9]。

由于气凝胶的孔径范围通常在 2 至 100 纳米之间，孔内的毛细管压力可达 1000 bar [10]。这种巨大的压力会导致孔隙塌陷、干燥样品开裂及其显著收缩[11]。因此，如何在去除溶剂的同时避免相界面的形成，成为气凝胶制备的核心科学问题。目前，常用的干燥方法包括常压干燥、冷冻干燥和超临界干燥。其中，超临界干燥因其能够消除表面张力，成为制备高性能无机和有机气凝胶的可靠方法。

2. 超临界干燥技术的基本原理

2.1. 超临界流体及其特性

超临界流体是指处于临界温度和临界压力以上的流体，其兼具气体和液体的特性：具有与气体相当的高扩散速率和低粘度[12]，同时又具有与液体相当的高密度和高溶解度。这些特性使超临界流体成为一种非常有效的传质介质。

当物质处于超临界状态时，气相和液相之间的界限消失，形成均一的单相体系。这一特性对于气凝胶干燥至关重要，因为它意味着在溶剂去除过程中不会形成气-液相界面，从而从根本上消除了表面张力和毛细管力的产生[13]。

2.2. 超临界干燥消除毛细压力的机理

在常规干燥过程中，随着溶剂的蒸发，气-液界面逐渐形成并进入凝胶孔隙，界面张力产生的毛细压力作用于脆弱的纳米骨架上，导致结构破坏。毛细压力的大小与溶剂的表面张力成正比，与孔径成反比[14]。对于孔径仅为数纳米的气凝胶而言，这种破坏力尤为显著。

超临界干燥的核心优势在于：通过将体系温度和压力升高至溶剂的临界点以上，使孔隙内的溶剂转变为超临界流体，此时气-液界面消失，表面张力不复存在。在保持超临界状态的前提下将溶剂移除，随后缓慢降压降温，即可获得保持原始网络结构的气凝胶[15]。

2.3. 超临界干燥的传质过程

超临界干燥过程中的传质主要依赖于溶剂在超临界流体中的溶解与扩散[16]。对于低温超临界二氧化碳干燥而言，干燥剂二氧化碳需首先溶解并置换凝胶孔隙中的原始溶剂。这一过程受多种因素影响，包括温度、压力、二氧化碳流速以及溶剂与二氧化碳的互溶性。干燥时间的长短取决于扩散路径长度、孔道曲折度以及操作条件，通常需要数小时至数十小时不等[17]。

3. 超临界干燥的工艺方法与参数控制

超临界干燥可以通过两种方式进行：高温超临界干燥和低温超临界干燥。其中，低温超临界干燥是目前最常见的方法。

3.1. 高温超临界干燥

高温超临界干燥直接以湿凝胶中的溶剂作为干燥介质，将温度和压力升高至该溶剂的临界点以上[18]。例如，若凝胶中含有乙醇，则需加热至乙醇的临界温度以上。这种方法无需溶剂交换步骤，流程相对简单。然而，许多常用溶剂的临界温度较高，高温条件可能导致凝胶骨架的化学变化或结构破坏，同时高压高温对设备安全性的要求也更高[19]。

3.2. 低温超临界二氧化碳干燥

低温超临界二氧化碳干燥被认为是更安全的工艺，因为它使用临界参数较低的附加溶剂作为干燥剂。二氧化碳因其多方面的优势而在超临界技术领域占据领先地位：其临界条件温和，易于实现超临界状态；同时无毒、不燃、不爆炸，且储量丰富、价格低廉。从技术实施的角度来看，二氧化碳是任何工艺的理想组成部分。此外，由于二氧化碳是大气的重要组成部分，因此不会污染环境，可被视为一种环境安全的溶剂。低温超临界二氧化碳干燥通常需要以下阶段：设备加载、加压、从设备的自由体积中置换溶剂、扩散替换凝胶孔中的溶剂、减压和设备卸载。由于水在超临界二氧化碳中的溶解度较低，因此当凝胶以水为溶剂时，溶剂交换是非常关键的步骤。通常需要将水置换为与二氧化碳互溶性更好的有机溶剂，如乙醇、异丙醇或丙酮[8]。

在超临界干燥过程中，凝胶内部的原始溶剂通过分子扩散被超临界二氧化碳逐步取代。每个溶剂与二氧化碳组成的二元系统在一定温度下都存在混合物临界压力。当压力升至该临界压力以上时，气相和液相之间的相界消失，溶剂和二氧化碳以任何比例完全混溶。因此，超临界干燥是一个单相过程，避免了相界面的表面张力，从而完美保留了气凝胶的纳米结构。

3.3. 工艺参数对干燥效果的影响

研究不同的工艺参数如何影响超临界干燥过程的每个阶段具有重要意义。工艺参数主要包括温度、压力、干燥剂流量和卸压速率等。

温度对干燥过程的影响体现在多个方面：提高温度可以增加溶剂在超临界二氧化碳中的溶解度，加速扩散过程，从而缩短干燥时间。但温度过高可能引起凝胶骨架的化学变化，或导致热应力引发开裂。压力的影响同样关键：压力升高可提高超临界二氧化碳的密度，增强其溶解能力，有利于溶剂的快速移除[20]。但过高的压力会增加设备投资和能耗，对安全性的要求也更高。干燥剂流量直接影响传质速率：较大的流量可以加快设备自由体积中溶剂的置换速度，并在凝胶周围维持较高的浓度梯度，促进孔内溶剂的扩散[21]。但流量过大可能导致二氧化碳浪费，增加运营成本。卸压速率是常被忽视但至关重要的参数：卸压过快可能导致溶解在超临界二氧化碳中的溶剂因压力骤降而析出，重新在孔隙内形成相界面，或导致凝胶内外压力差过大而产生结构破坏[22]。因此，缓慢控制卸压速率是保证干燥质量的关键。

通过优化这些工艺参数，可以在保证气凝胶质量的同时减少干燥剂消耗和过程时间，从而强化超临界干燥过程，降低资本和运营成本。

4. 超临界干燥对不同类型气凝胶的适用性

4.1. 二氧化硅气凝胶

二氧化硅气凝胶是研究最深入、应用最广泛的气凝胶材料。以二氧化硅气凝胶为代表进行超临界干燥的研究表明，通过超临界二氧化碳干燥可以获得具有高比表面积、高孔隙率和低密度的理想产品。与传统的冷冻干燥相比，超临界干燥能够更好地保留初始凝胶的纳米多孔结构，避免了因冰晶生长导致的大孔形成和比表面积减小。

4.2. 有机聚合物气凝胶

有机气凝胶，如间苯二酚-甲醛气凝胶、聚氨酯气凝胶和聚酰亚胺气凝胶等，结合了有机材料的柔韧性和气凝胶的多孔结构[23]。尽管超临界干燥已成为制备聚合物气凝胶广泛使用的方法，但研究发现某些情况下该方法仍可能导致气凝胶的严重收缩。关于超临界干燥过程中聚合物气凝胶收缩机理的研究尚不完整，有待进一步深入。此外，干燥程序各异，许多程序处理时间较长，且需要用液态二氧化碳预先更换溶剂，这些特征可能导致低重现性和较高的二氧化碳消耗，对于该技术的工业化构成挑战。

4.3. 生物基气凝胶

生物基气凝胶通常由亲水性生物聚合物制成，在富含水分的环境中不稳定，这给干燥过程带来特殊挑战。由于水在超临界二氧化碳中的溶解度较低，因此溶剂交换步骤尤为关键。研究者们开发了多种创新策略来应对这一挑战。如制备疏水性生物气凝胶：使用食用油开发食品级油凝胶，然后通过超临界二氧化碳将其去除。这种方法避免了传统的溶剂交换和干燥步骤。选择疏水性聚合物如乙基纤维素，并选择低分子量的油以利于除油，可形成低密度稳定的气凝胶[24]。研究表明，在某些情况下，二氧化碳除了充当干燥剂之外，还有助于气凝胶纳米纤维结构的形成。例如，二氧化碳处理可导致壳聚糖链发生物理凝固，从而赋予其优异的光学和隔热性能[25]。超临界二氧化碳干燥之前的溶剂交换过程可能繁琐且漫长。为克服这一问题，研究者尝试在乙醇中直接形成多糖气凝胶，从而避免了溶剂交换步骤。将果胶、藻酸盐、黄原胶和瓜尔胶溶解在水中，在乙醇中胶凝，然后直接用超临界二氧化碳干燥。乙醇的添加使疏水相互作用最大化，同时使亲水相互作用最小化。基于这一原理，已开发出新型生物相容性乙醇诱导的果

胶-黄原胶气凝胶,用于骨科等生物医学应用[26]。

4.4. 复合与杂化气凝胶

对于多组分复合气凝胶和杂化气凝胶,超临界干燥同样展现出良好的适用性。不同组分的界面稳定性与干燥工艺的匹配是关键考量因素。通过优化工艺条件,可以在保持各组分分布均匀性的同时,获得结构完整的多功能气凝胶材料。

5. 超临界干燥与其他干燥技术的比较

5.1. 冷冻干燥

冷冻干燥法通过将溶剂冷冻成固态,然后在真空条件下使冰直接升华,从而去除溶剂。这种方法适用于以水溶性聚合物为前驱体制备的凝胶。通过调整冷冻参数,可以制备具有微孔至亚微孔结构的气凝胶。与超临界干燥相比,冷冻干燥存在固有局限性:凝胶内部形成的晶体会导致大孔的产生,破坏原始的网络结构,从而导致比表面积减小。尽管冷冻干燥可以获得高度多孔的材料,但凝胶的初始结构仍然在一定程度上被破坏。

5.2. 常压干燥

常压干燥是最简单、成本最低的干燥方法。但在常压干燥过程中,溶剂的表面张力引起毛细管力的产生。这种力作用于脆弱的凝胶骨架上,极易导致湿凝胶塌陷。为了使常压干燥成为可能,需要对凝胶骨架进行增强或表面修饰。常用的策略包括表面疏水化改性,通过引入疏水基团来减少干燥过程中的收缩。然而,与超临界干燥相比,常压干燥获得的气凝胶在孔隙率、比表面积和结构完整性方面通常存在明显差距。

5.3. 各类干燥技术的综合比较

综合而言,超临界干燥在保持气凝胶原始结构方面具有不可替代的优势:由于表面张力可以忽略不计,能够防止凝胶塌陷,完美保留纳米多孔网络。干燥过程相对高效,约需4至6小时,而传统干燥可能需要一天或更长时间[27]。超临界干燥也存在明显不足:设备投资大,工艺技术复杂,运营成本高。在工业规模上设计超临界干燥工艺需要大量的资金投入和高压技术的特殊安全预防措施。因此,干燥方法的选择需要在性能要求与成本控制之间进行权衡。对于追求极致性能的应用场景,超临界干燥仍是首选;而对于性能要求相对较低、成本敏感领域,常压干燥和冷冻干燥可能是更经济的选择。

6. 超临界干燥技术的应用案例

6.1. 高性能隔热材料制备

超临界干燥制备的二氧化硅气凝胶具有超低的导热系数,可低至0.013至0.020瓦每米每开,远低于空气的导热系数。这使得其在航天航空和建筑节能领域成为理想的隔热材料[2]。通过超临界干燥保留的纳米孔结构能够有效抑制气体对流和固体传热,是实现极限隔热性能的关键。

6.2. 催化剂载体材料制备

高比表面积是气凝胶作为催化剂载体的核心优势。超临界干燥能够最大限度地保留凝胶的原始比表面积,为活性组分的负载提供充足的空间。同时,超临界条件下的干燥过程对负载的活性组分影响较小,具有良好的工艺兼容性。

6.3. 药物负载与控释系统

在生物医学领域，超临界干燥可用于制备载药气凝胶。药物可在凝胶制备阶段引入，或在干燥前通过吸附负载。超临界二氧化碳的温和临界条件有利于保持药物的化学稳定性和生物活性。干燥后获得的多孔结构可实现药物的可控释放。

6.4. 其他前沿应用

超临界干燥技术制备的气凝胶还在敏感压阻传感器、气体吸附剂、水净化材料以及伤口愈合材料等领域展现出应用潜力[5]。随着新型气凝胶材料的不断涌现，超临界干燥的应用范围将持续扩大。

7. 挑战与展望

7.1. 当前技术面临的挑战

超临界干燥技术的工业应用仍面临多重挑战。首先，高压设备的投资成本高昂，这限制了该技术在中小企业的推广。其次，目前大多采用间歇式生产，效率相对较低，难以满足大规模连续生产的需求。第三，溶剂回收与环保问题需要妥善解决，以减少有机溶剂的排放。第四，随着气凝胶向多组分、杂化和生物基方向发展，现有干燥工艺需要针对新体系进行优化适配。此外，干燥过程的低重现性问题，特别是对于需要长时间溶剂交换的体系，有待进一步研究解决。

7.2. 未来发展方向

为应对上述挑战，未来超临界干燥技术的研究将沿着以下方向深入发展：

连续式超临界干燥工艺的开发是重要方向之一。通过设计连续进料和出料系统，有望突破间歇式生产的效率瓶颈，大幅提高产能并降低单位产品的能耗和成本。通过优化传质传热过程、缩短干燥时间、减少干燥剂消耗，可以在保证产品质量的同时显著降低运营成本。绿色溶剂的替代方案也是研究热点。探索与二氧化碳相容性更好的绿色溶剂，或开发无需溶剂交换的直接干燥工艺，进一步提升超临界干燥的环境友好性。与新型气凝胶材料的工艺适配是未来研究的重点。随着生物基气凝胶、杂化气凝胶等新型材料的不断涌现，需要针对其独特的化学组成和结构特征，开发定制化的干燥工艺参数。

8. 结论

超临界干燥技术是制备高性能气凝胶的核心工艺，其通过消除气-液相界面的表面张力，能够完美保留湿凝胶的纳米多孔结构。低温超临界二氧化碳干燥因其温和的临界条件和环境友好的特性，成为当前应用最广泛的方法。工艺参数如温度、压力、干燥剂流量和卸压速率对干燥效果具有显著影响，优化这些参数可以在保证质量的同时缩短时间、降低成本。超临界干燥在二氧化硅气凝胶、有机聚合物气凝胶、生物基气凝胶及复合气凝胶的制备中均展现出良好的适用性，但与冷冻干燥和常压干燥相比，其设备投资和运营成本较高。未来，通过连续化生产、过程强化、绿色溶剂开发和智能化控制等技术进步，超临界干燥有望突破当前瓶颈，推动高性能气凝胶材料在更广泛领域的产业化应用。随着新型气凝胶材料的不断涌现和干燥工艺的持续优化，超临界干燥技术必将在气凝胶科学与工程领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] Zhang, X., Cheng, X., Si, Y., Yu, J. and Ding, B. (2022) Elastic and Highly Fatigue Resistant ZrO₂-SiO₂ Nanofibrous Aerogel with Low Energy Dissipation for Thermal Insulation. *Chemical Engineering Journal*, **433**, Article ID: 133628. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133628>

- [2] Ma, S., Wang, C., Cong, B., Zhou, H., Zhao, X., Chen, C., *et al.* (2022) Anisotropic All-Aromatic Polyimide Aerogels with Robust and High-Temperature Stable Properties for Flexible Thermal Protection. *Chemical Engineering Journal*, **431**, Article ID: 134047. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134047>
- [3] Liu, H., Du, H., Zheng, T., Liu, K., Ji, X., Xu, T., *et al.* (2021) Cellulose Based Composite Foams and Aerogels for Advanced Energy Storage Devices. *Chemical Engineering Journal*, **426**, Article ID: 130817. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130817>
- [4] Qin, Z., Lv, Y., Fang, X., Zhao, B., Niu, F., Min, L., *et al.* (2022) Ultralight Polypyrrole Crosslinked Nanofiber Aerogel for Highly Sensitive Piezoresistive Sensor. *Chemical Engineering Journal*, **427**, Article ID: 131650. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131650>
- [5] Li, Z., Zhu, S., Mao, F., Zhou, Y., Zhu, W. and Tao, D. (2022) CTAB-Controlled Synthesis of Phenolic Resin-Based Nanofiber Aerogels for Highly Efficient and Reversible SO₂ Capture. *Chemical Engineering Journal*, **431**, Article ID: 133715. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133715>
- [6] Zhao, X., Yi, X., Song, J., Yuan, X., Yu, S., Nie, Y., *et al.* (2022) Mesoporous and Flexible Polyimide Aerogel as Highly Active Catalytic Membrane for AO7 Degradation by Peroxymonosulfate Activation. *Chemical Engineering Journal*, **431**, Article ID: 134286. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134286>
- [7] Zheng, Y., Ma, W., Yang, Z., Zhang, H., Ma, J., Li, T., *et al.* (2022) An Ultralong Hydroxyapatite Nanowire Aerogel for Rapid Hemostasis and Wound Healing. *Chemical Engineering Journal*, **430**, Article ID: 132912. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132912>
- [8] Menshutina, N., Tsygankov, P., Khudeev, I. and Lebedev, A. (2022) Intensification Methods of Supercritical Drying for Aerogels Production. *Drying Technology*, **40**, 1278-1291. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1866005>
- [9] Khudeev, I.I., Lebedev, A.E., Mochalova, M.S. and Menshutina, N.V. (2024) Modeling and Techno-Economic Optimization of the Supercritical Drying of Silica Aerogels. *Drying Technology*, **42**, 812-835. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2318439>
- [10] Soleimani Dorcheh, A. and Abbasi, M.H. (2008) Silica Aerogel; Synthesis, Properties and Characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, **199**, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060>
- [11] Glenn, G.M., Klameczynski, A.P., Woods, D.F., Chiou, B., Orts, W.J. and Imam, S.H. (2010) Encapsulation of Plant Oils in Porous Starch Microspheres. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **58**, 4180-4184. <https://doi.org/10.1021/jf9037826>
- [12] Kiran, E., Debenedetti, P.G. and Peters, C.J. (2012) *Supercritical Fluids: Fundamentals and Applications*. Springer Science & Business Media.
- [13] Bassing, D. and Braeuer, A.S. (2021) The Influence of Temperature and Pressure on Macro- and Micro-Mixing in Compressed Fluid Flows; Mixing of Carbon Dioxide and Ethanol above Their Mixture Critical Pressure. *The Journal of Supercritical Fluids*, **167**, Article ID: 105036. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105036>
- [14] Breinlinger, T., Hashibon, A. and Kraft, T. (2015) Simulation of the Influence of Surface Tension on Granule Morphology during Spray Drying Using a Simple Capillary Force Model. *Powder Technology*, **283**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.009>
- [15] Qiao, S., Kang, S., Zhang, H., Yu, J., Wang, Y. and Hu, Z. (2021) Reduced Shrinkage and Mechanically Strong Dual-Network Polyimide Aerogel Films for Effective Filtration of Particle Matter. *Separation and Purification Technology*, **276**, Article ID: 119393. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119393>
- [16] Aegerter, M.A., Leventis, N. and Koebel, M.M. (2011) *Aerogels Handbook*. Springer Science & Business Media.
- [17] Elmanovich, I.V., Pryakhina, T.A., Vasil'ev, V.G., Gallyamov, M.O. and Muzafarov, A.M. (2018) A Study of the Hydrosilylation Approach to a One-Pot Synthesis of Silicone Aerogels in Supercritical Co₂. *The Journal of Supercritical Fluids*, **133**, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.11.017>
- [18] Bedilo, A.F. and Klabunde, K.J. (1997) Synthesis of High Surface Area Zirconia Aerogels Using High Temperature Supercritical Drying. *Nanostructured Materials*, **8**, 119-135. [https://doi.org/10.1016/s0965-9773\(97\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0965-9773(97)00011-1)
- [19] Wang, P., Emmerling, A., Tappert, W., Spormann, O., Fricke, J. and Haubold, H.G. (1991) High-Temperature and Low-Temperature Supercritical Drying of Aerogels – Structural Investigations with SAXs. *Journal of Applied Crystallography*, **24**, 777-780. <https://doi.org/10.1107/s0021889891002327>
- [20] Wang, Z., Liu, F., Wei, W., Dong, C., Li, Z. and Liu, Z. (2023) Influence of Supercritical Fluid Parameters on the Polyimide Aerogels in a High-Efficiency Supercritical Drying Process. *Polymer*, **268**, Article ID: 125713. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125713>
- [21] Schwan, M., Nefzger, S., Zoghi, B., Oligschleger, C. and Milow, B. (2021) Improvement of Solvent Exchange for Supercritical Dried Aerogels. *Frontiers in Materials*, **8**, Article 662487. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.662487>
- [22] Basak, S. and Singhal, R.S. (2023) The Potential of Supercritical Drying as a “Green” Method for the Production of

- Food-Grade Bioaerogels: A Comprehensive Critical Review. *Food Hydrocolloids*, **141**, Article ID: 108738. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108738>
- [23] Pekala, R.W. and Kong, F.M. (1989) A Synthetic Route to Organic Aerogels—Mechanism, Structure, and Properties. *Le Journal de Physique Colloques*, **24**, C4-33-C4-40. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1989406>
- [24] Manzocco, L., Basso, F., Plazzotta, S. and Calligaris, S. (2021) Study on the Possibility of Developing Food-Grade Hydrophobic Bio-Aerogels by Using an Oleogel Template Approach. *Current Research in Food Science*, **4**, 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.02.005>
- [25] Tkalec, G., Knez, Ž. and Novak, Z. (2015) Formation of Polysaccharide Aerogels in Ethanol. *RSC Advances*, **5**, 77362-77371. <https://doi.org/10.1039/c5ra14140k>
- [26] Horvat, G., Khanari, K., Finšgar, M., Gradišnik, L., Maver, U., Knez, Ž., *et al.* (2017) Novel Ethanol-Induced Pectin-Xanthan Aerogel Coatings for Orthopedic Applications. *Carbohydrate Polymers*, **166**, 365-376. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.008>
- [27] Taberero, A., Baldino, L., Misol, A., Cardea, S. and del Valle, E.M.M. (2020) Role of Rheological Properties on Physical Chitosan Aerogels Obtained by Supercritical Drying. *Carbohydrate Polymers*, **233**, Article ID: 115850. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115850>