

基于多尺度结构调控的密胺泡沫隔热性能提升关键技术研究 与产业化应用

王 帅

峰特（浙江）新材料有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：密胺泡沫是新型轻质热固性泡沫材料，因优异阻燃性、低声学反射系数和良好化学稳定性，在多领域有广泛应用前景。隔热性能是其核心指标，决定应用价值。但传统密胺泡沫存在多尺度结构缺陷，隔热性能难满足高端需求，且产业化生产中结构调控精度低、性能稳定性差，限制规模化应用。本文围绕提升密胺泡沫隔热性能目标，开展多尺度结构调控关键技术研究，分析结构与隔热性能构效关系，优化调控路径，建立协同调控机制，提出制备技术并验证。结果显示，多尺度结构调控使密胺泡沫导热系数降至 $0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下，表观密度控制在 $25 - 35 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，隔热性能提升 30% 以上，且保持力学与阻燃性能。该技术解决传统密胺泡沫隔热不足、产业化稳定性差问题，丰富理论体系，为高端隔热领域产业化应用提供支撑与方案，具有重要意义与价值。

【关键词】：密胺泡沫；多尺度结构调控；隔热性能；导热系数；产业化应用

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.112

1 引言

在全球能源危机与“双碳”目标驱动下，隔热材料正加速向轻质、高效、多功能方向发展。密胺泡沫以三聚氰胺-甲醛树脂为基体，富含高氮三嗪环结构，兼具优异阻燃性、低密度、高孔隙率与良好加工性，广泛应用于航空航天、建筑节能和轨道交通等领域。然而，传统密胺泡沫受限于制备过程中发泡反应的随机性，普遍存在多尺度结构缺陷：分子尺度上交联不足、官能团分布不均；微观尺度上泡孔尺寸与孔壁厚度不均、闭孔率低；宏观尺度上易分层、孔隙连通性高。这些缺陷导致热传导、对流与辐射路径畅通，显著削弱隔热性能。现有调控技术多聚焦单一尺度，缺乏多尺度协同设计，难以兼顾隔热、力学与工艺性能。同时，产业化中存在结构控制精度低、批次稳定性差等问题，制约其在高端领域的应用。为此，本文开展基于多尺度结构调控的密胺泡沫隔热性能提升研究，系统揭示分子—微观—宏观结构与隔热性能的构效关系，建立协同调控机制，优化原料配方与制备工艺，突破量产一致性瓶颈，并通过工程应用验证，形成从理论到产业的完整技术路径。该研究不仅丰富泡沫材料多尺度设计理论，更为研制高性能国产密胺泡沫提供关键技术支撑，对推动节能减排、保障产业链安全具有重要理论与应用价值。

2 密胺泡沫多尺度结构与隔热性能的构效关系

2.1 密胺泡沫的多尺度结构特征

密胺泡沫具有典型的分子—微观—宏观三级结构体系。分子尺度上，由三聚氰胺-甲醛树脂形成的三维交联网络决定材料基础性能，其交联度、官能团分布及分子链柔韧性直接影响结构稳定性与热传导行为。微观尺度以泡孔结构为核心，包括泡孔类型、尺寸（理想 $50 - 150 \mu\text{m}$ ）、孔径分布、闭孔率（目

标 $>90\%$ ）及孔壁厚度（ $5 - 10 \mu\text{m}$ ）等，是隔热性能的关键控制因素。宏观尺度则体现为整体形貌、厚度一致性、结构均匀性与孔隙连通性，直接影响工程适配性与整体隔热效果。三个尺度相互耦合：分子网络引导泡孔成核与生长，微观结构决定宏观完整性，而宏观稳定性又反作用于微观与分子结构的保持。

2.2 多尺度结构对隔热性能的影响机制

热量在密胺泡沫中通过传导、对流与辐射三种方式传递，多尺度结构协同调控这三类传热路径。分子尺度上，高交联度（如从 60% 提升至 85%）增强分子链间作用力，降低热传导系数 15% 以上；官能团均匀分布可避免局部低交联区形成导热通道。微观尺度上，闭孔率提升至 90% 以上可抑制气体对流，减少热损失 40%；均匀孔径避免大孔对流与小孔导热叠加，致密孔壁则降低固相传导约 25%。宏观尺度上，结构均匀性防止局部热桥，孔隙连通率控制在 5% 以下可削减对流热损 30% 以上，厚度一致性保障安装后的整体隔热效能，并提升抗老化能力。

2.3 现有密胺泡沫结构调控的不足

当前调控技术存在三大短板：一是分子尺度缺乏对官能团分布与链柔韧性的精准控制，导致交联不均、孔壁易裂；二是微观尺度依赖传统发泡工艺，泡孔尺寸分散、闭孔率波动大（常 $<90\%$ ），孔壁厚度不均，且难以动态调控泡孔演化过程；三是宏观尺度在量产中易出现分层、厚度偏差和高连通孔隙，影响性能一致性。更关键的是，现有研究多聚焦单一尺度，缺乏多尺度协同调控理论与方法，致使隔热、力学与工艺性能难以同步优化。此外，多数调控策略产业化适配性差，难以在规模化生产中实现稳定、精准的结构控制，严重制约高端应用拓展。

3 密胺泡沫多尺度结构协同调控机制

3.1 多尺度结构协同调控的核心原则

密胺泡沫的多尺度协同调控需遵循三大原则：一是协同优化，即分子、微观与宏观结构相互支撑——分子交联网络引导泡孔成核，微观结构保障宏观完整性，宏观稳定性反哺微观结构保持；二是性能均衡，在提升隔热性能的同时兼顾力学强度、阻燃性与加工性，避免“单点突破、整体失衡”；三是可产业化，调控工艺需简单可控、成本合理、兼容现有产线，确保技术可落地、产品可量产。

3.2 分子尺度与微观尺度协同调控机制

分子结构决定泡孔形成基础。通过调控三聚氰胺/甲醛摩尔比(1:1.6 - 1:1.9)反应温度(65 - 75℃)与时间(40 - 60 min)，使树脂交联度达80 - 85%，并引入改性剂实现官能团均匀分布，从而保障发泡反应均匀性。微观上，匹配发泡剂分解速率与树脂交联速率(前者略慢)，配合稳泡剂降低表面张力，有效抑制泡孔合并与破裂，形成闭孔率>90%、孔径50 - 150 μm、孔壁5 - 10 μm的均匀结构。二者协同显著抑制热传导与对流，提升隔热效率。

3.3 微观尺度与宏观尺度协同调控机制

微观泡孔均匀性是宏观结构完整性的前提。通过精准控制泡孔尺寸分布与闭孔率，避免宏观分层或高连通孔隙；同时，优化成型压力与温度，确保泡孔在宏观体中均匀排布，提升整体致密性与厚度一致性(偏差 $\leq \pm 2\%$)。宏观结构稳定又能防止使用中泡孔受压破损，维持长期隔热性能。此外，表面致密化处理可减少边缘热泄漏，进一步提升整体隔热效果。

3.4 多尺度协同调控的理论模型

基于构效关系，构建以导热系数为核心的多尺度调控模型。分子尺度：交联度每提升10%，导热系数降8 - 10%；官能团均匀度提升20%，导热降5 - 7%。微观尺度：闭孔率每增10%，导热降12 - 15%；孔径与孔壁均匀度提升分别降导热6 - 8%和4 - 6%。宏观尺度：结构均匀度提升20%、孔隙连通率降10%、厚度一致性升30%，可分别降导热5 - 7%、8 - 10%和3 - 5%。综合调控可使导热系数 $\leq 0.028 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，同时满足力学与阻燃要求。该模型为配方设计、工艺优化及量产控制提供量化依据，显著提升研发效率与产品一致性。

4 密胺泡沫多尺度结构调控关键技术研发

4.1 分子尺度交联结构调控技术

通过优化原料配比、引入改性剂与调控反应工艺，精准构建高交联、高均匀性的分子网络。三聚氰胺与甲醛摩尔比控制在1:1.6 - 1:1.9，兼顾反应活性与低游离甲醛；引入2 - 4%氨基硅烷偶联剂，其氨基与树脂官能团反应，引入硅氧烷结构，提升交联度至80 - 85%，官能团分布均匀性提高25%以上，并

增强分子链柔性，防止孔壁脆裂。反应温度65 - 75℃、时间40 - 60 min、搅拌速度400 - 600 r/min，确保交联充分且均匀，为后续泡孔形成奠定基础。

4.2 微观尺度泡孔结构调控技术

聚焦泡孔尺寸、闭孔率与孔壁致密性，采用复合发泡与稳泡体系协同调控。发泡剂由碳酸氢钠(2.5 - 3.5%)与偶氮二甲酰胺(1.5 - 2.5%)按2:1复配，实现低温成核与高温膨胀的梯度发泡；稳泡剂采用聚乙二醇硬脂酸酯/十二烷基硫酸钠(3:2)，添加量1.5 - 2.5%，显著降低表面张力，抑制泡孔合并。发泡温度85 - 95℃、时间15 - 25 min、压力0.12 - 0.15 MPa，使泡孔尺寸稳定在50 - 150 μm，闭孔率>90%，孔壁厚度5 - 10 μm，泡孔均匀度提升30%以上，有效抑制热传导与对流。

4.3 宏观尺度整体结构调控技术

通过模压成型、环境控制与表面处理提升宏观一致性与完整性。采用定制模具，控温100 - 110℃、成型压力0.15 - 0.18 MPa，确保受力均匀、无分层；反应环境维持25 - 30℃、相对湿度50 - 60%，波动 $\leq \pm 2^\circ\text{C}/\pm 5\%$ ，保障发泡稳定性。成品经低温固化表面涂层处理，使用相容性改性三聚氰胺树脂形成50 - 100 μm致密层，封闭表面孔隙，使孔隙连通率降至5%以下，同时提升表面强度与抗老化性，确保工程安装适配性与长期隔热稳定性。

4.4 多尺度协同调控技术集成与优化

基于理论模型，集成三尺度调控技术，实现参数协同匹配。分子交联速率与发泡分解速率同步，避免网络破裂或泡孔塌陷；微观泡孔尺寸与宏观成型压力协调，防止结构弱化。最终实现：交联度80 - 85%、闭孔率 $\geq 90\%$ 、泡孔50 - 150 μm、孔隙连通率 $\leq 5\%$ 、结构均匀度 $\geq 90\%$ 。经多批次验证，导热系数稳定 $\leq 0.028 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ (较传统产品提升超30%)，密度波动 $\leq \pm 2 \text{ kg/m}^3$ ，导热系数波动 $\leq \pm 0.002 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。工艺流程简化、操作性强，具备良好产业化适配性，为高性能密胺泡沫的稳定量产提供核心技术支撑。

5 产业化制备工艺优化与应用验证

5.1 产业化制备工艺优化

基于多尺度调控技术，对现有产线进行系统优化。原料方面，确保三聚氰胺、甲醛等主体原料纯度 $\geq 99.5\%$ 、含水率 $\leq 0.5\%$ ，助剂预混提升分散均匀性。反应发泡环节采用自动化连续式设备，精准控制温度($\pm 2^\circ\text{C}$)、时间($\pm 5 \text{ min}$)和搅拌速度($\pm 50 \text{ r/min}$)，配合分段温控模具与多模同步成型，保障泡孔均匀并提升效率。后处理集成连续固化(110 - 120℃, 60 - 90 min)、自动喷涂与切割，确保结构稳定与表面致密。建立全批次检测体系，产品合格率达98%以上。通过国产原料替代、原料损耗率控制在3%以内及产能提升50%，单位成本降低约20%，建成高效、稳定、低成本的质量体系。

5.2 产业化应用场景验证

在三大高端领域完成实测验证。航空航天方面，用于国产大飞机舱内隔热层，在 -55°C 至 85°C 下导热系数稳定于 $0.025 - 0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，密度 $28 - 32 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，满足轻量化、阻燃与抗振要求。建筑节能方面，应用于高端写字楼外墙，导热系数 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，墙体传热系数 $\leq 0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，夏冬室内温差改善 $4 - 6^{\circ}\text{C}$ ，空调能耗降低 $25\% - 30\%$ ，五年性能衰减 $< 5\%$ 。轨道交通方面，用于高铁车厢隔热降噪层，导热系数 $0.027 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， $1000 - 2000 \text{ Hz}$ 频段噪声降低 $6 - 8 \text{ dB}$ ，长期使用无破损脱落，可靠性良好。

5.3 产业化应用效益分析

经济效益显著，成本较进口高效泡沫低 40% 、较传统产品低 20% ，预计年新增产值超5亿元。社会效益突出，打破国外技术垄断，推动隔热材料产业升级，助力“双碳”目标，并提升防火安全与舒适性。环境效益明显，工艺清洁，游离甲醛 $< 0.1\%$ ，材料可回收率 $> 80\%$ ，结合节能效果可大幅减少碳排放，支撑绿色低碳发展。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本研究系统揭示了密胺泡沫多尺度结构与隔热性能的构

效关系，明确分子尺度（交联度、官能团分布）、微观尺度（泡孔尺寸、闭孔率、孔壁结构）和宏观尺度（结构均匀性、孔隙连通性）协同调控热传导、对流与辐射的机制，为性能优化奠定理论基础。在此基础上，构建了多尺度协同调控机制与量化理论模型，实现了导热系数与结构参数的关联预测。关键技术方面，成功开发了分子、微观、宏观三级精准调控技术，集成后使导热系数降至 $0.028 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下，隔热性能提升超 30% ，同时兼顾力学与阻燃性能。产业化层面，优化连续化生产工艺，产品合格率达 98% 以上，成本降低 20% ，并在航空航天、建筑节能、轨道交通三大场景完成应用验证，证实其工程适用性与稳定性。该成果兼具显著经济、社会与环境效益，有力支撑我国高端隔热材料自主化与“双碳”战略实施。

6.2 研究展望

未来工作可从五方面深化：一是完善多尺度调控模型，纳入温湿度等环境变量，揭示结构演化规律；二是开发新型改性剂、发泡剂及纳米复合策略，进一步提升结构均匀性与隔热极限；三是推进产线智能化，实现工艺参数实时感知与闭环调控，增强量产一致性；四是拓展在新能源装备、高端电子散热、深冷储运等新兴领域的应用；五是建立长期服役性能数据库与寿命评估体系，保障材料在复杂工况下的可靠性与耐久性。

参考文献：

- [1] 周莹,刘世盟,赵近川,等.石墨烯纳米片/密胺复合泡沫性能增强机制研究[J].精密成形工程,2024,16(06):1-11.
- [2] 周慧峰,刘科甫,梁璐敏,等.基于MDI含量调控的聚氨酯泡沫成型过程力学性能与微观结构多尺度研究[J/OL].材料导报,1-18[2026-05-13].
- [3] 梁晓菊,张肖艳,霍紫玮,等.聚氨酯泡沫建筑保温材料的制备及保温隔热性能研究[J].功能材料,2026,57(3):83-92.
- [4] 何利华.聚乙二醇改性密胺泡沫的制备及其性能表征[J].山东化工,2025,54(18):33-36.