

中国科学院大连化学物理研究所

优秀博士后支持计划申请表

申请人: 刘汉卿

研究组: 508 组

学科专业: 物理化学

合作导师: 吴忠帅 研究员

填表日期: 2025 年 7 月 22 日

中国科学院大连化学物理研究所制

姓 名	刘汉卿		性 别	男
			民 族	汉
学历/学位	博士		授予博士学位时间	2025. 1. 5
博士毕业院校	中国科学院大学		专 业	物理化学
(拟)进站时间	2025. 1. 23		进站性质	☒ 统招统分 ☐ 在职人员
学习经历从本科起	起止年月	所在单位/专业		所获学位
	2018. 09-2025. 01	中科院大连化学物理研究所/物理化学		博士
	2014. 09-2018. 07	郑州大学		学士
工作经历	起止年月	所在单位		职务
	2025. 01	中国科学院大连化学物理研究所		博后
博士	博士论文题目	柔性相变纤维制备及人体调温应用研究		

学位论文摘要	(限 800 字) 相变纤维因其在特定相变温度吸收或释放大​​量热能而在人体调温应用领域备受关注。然而，传统的固-液相变材料存在液相易流动及固相刚性大的问题，极大限制了其在相变纤维制备方面的应用。针对此问题，本论文系统开展了柔性相变纤维的制备及其在人体调温应用的研究工作。基于烷烃与聚乙二醇等固-液相变材料，通过柔性多孔纤维载体负载、聚合物包覆、离子交联以及缩聚反应等方式极大改善了固-液相变材料的液体泄漏和固相强刚​​性问题，制备了几种具有优异形状稳定性的柔性相变纤维，探索了其在不同外界温度环境下人体热管理能力以及调温性能，为新型人体调温相变纤维的开发与应用研究提供了重要参考。 (1) 针对有机固-液相变材料液体泄漏问题，发展了基于湿法纺丝与冷冻干燥技术制备柔性多孔石墨烯-氮化硼纤维膜的策略，利用真空浸渍方法成功制备出石墨烯-氮化硼基柔性复合相变纤维膜。该复合相变纤维膜相变焓值最高为 206 J/g，经历 1000 次冷热循环后储热密度仍能保持在 95%以上；同时，还展现出优异的疏水性（水接触角大于 130°）、自清洁及光-热转化能力，以及与棉布相当的透气能力。(2) 针对商用复合相变纤维使用过程中微胶囊发生脱落等问题，利用聚合物双层封装与湿法纺丝技术制备出海藻酸钠-微胶囊基柔性复合相变纤维。该相变纤维制备过程简单高效，通过聚合物双层封装解决了相变材料泄漏与刚​​性问题。(3) 为了解决固-液相变材料和微胶囊本征强刚​​性的问题，开发出一种无毒环保的绿色湿法纺丝技术，成功制备出具有本征柔性的聚环氧乙烷基相变纤维。(4) 针对目前相变纤维耐水洗性差、柔性弱以及商业氨纶纤维不具有相变调温功能等问题，基于开发出具有相变功能的氨纶纤维为目标，通过缩聚反应和湿法纺丝实现了具有固-固相变行为的本征柔性聚氨酯基相变纤维的制备。(5) 针对相变材料储能密度有限导致调温性能不足的缺点，通过红外辐射调控策略，制备出了具有红外辐射冷却和相变调温双重调温功能的复合相变纤维膜。					
	1、主持或参与项目情况：					
	序号	项目名称	项目来源	项目金额	起止年度	角色
	1	碳基多孔相变热管理复合材料技术	科技部项目	1800 万	2022.10-2025.10	参与
	2	柔性相变材料及其人体温度防护应用研究	研究所基金	200 万	2020.08~2022.07	参与
	3	相变材料的定形负载、宏量制备与产品技术	国家重点研发计划	290 万	2022.11~2025.10	参与
	4	量热法研究二维材料基复合相变材料热力学性屈	国家自然科学基金	70 万	2023.01~2026.12	参与
	2、代表性论文（5 篇以内）					
	注：“作者排序”中，如为通讯作者请填写“C”。					
	序号	论文题目	期刊名	影响因子	发表年度/卷期/页码	排序
1	Intrinsically flexible phase change fibers for intelligent thermal regulation	Angewandte Chemie International Edition	16.9	2024, e202408857	1	
入站前期						

及 入 站 后 科 研 情 况 简 介	2	A thermoregulatory flexible phase change nonwoven for all-season high-efficiency wearable thermal Management	Nano-Micro Letters	36.3	2023, 15, 29	1
	3	Two-dimensional materials and their derivatives for high performance phase change materials: emerging trends and challenges	Energy Storage Materials	20.2	2021, 42, 845-870	1
	4	Facile green strategy of fabricating flexible phase change fibers with high thermal energy capacity	ACS Sustainable Chemistry & Engineering	7.3	2025, 13, 267-275	1
	5	Recent advances and prospects of graphene-based fibers for application in energy storage devices	Acta Physico-Chimica Sinica	13.5	2022, 38, 2204017	1
	其他论文发表情况					
	1	Water-in-salt ambipolar redox electrolyte extraordinarily boosting high pseudocapacitive performance of micro-supercapacitors	ACS Energy Letters	18.2	2022, 7, 1706-1711	3
	2	Flexible insulating phase change composite film with improved thermal conductivity for wearable thermal management	Nano Energy	17.1	2024,121,109256	3
	3	Thermally enhanced flexible phase change materials for thermal energy conversion and management of wearable electronics	Materials Today Sustainability	7.9	2024, 28, 100960	2
	4	Design, progress and challenges of 3D carbon-based thermally conductive networks	New Carbon Materials	6.8	2024, 39, 844-871	2
	5	An ultrastretchable seamlessly integrated contactless charging microsystem towards skin-attachable wireless microelectronics	Nature Communications	15.7	2025, 16, 1642	5
	6	Synchronous visual/infrared stealth using an intrinsically flexible self-healing phase change film	Advanced Functional Materials	19.0	2023, 33, 22122	5
	7	Spatiotemporal utilization of latent heat in erythritol-based phase change materials as solar thermal fuels	Angewandte Chemie International Edition	16.9	2024, 202400759	5

	8	A near-surface structure reconfiguration strategy to regulate $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ and $\text{O}_2^{2-}/(\text{O}_2)^{\bullet-}$ redox for stabilizing lithium-rich oxide cathode	Advanced Functional Materials	19.0	2023, 33, 23009	4
	9	Low-temperature and high-voltage planar micro-supercapacitors based on anti-freezing hybrid gel electrolyte	Journal of Energy Chemistry	14.9	2022, 72, 195-202	4
	10	Melamine foam/CNT/graphene hybrid aerogel-based phase change composites with high latent heat capacity for solar/electrothermal conversion	ACS Applied Energy Materials	5.5	2023, 6, 14, 7457-7467	3
	3、专利情况：					
	序号	专利名称	授权/申请	授权/申请号	起始日期	排序
	1	一种储热调温复合相变无纺布的制备方法	授权	ZL202111532077.X	2021.12.15	3
	2	一种功能性相变纤维及制备和应用	申请	2023116909600	2023.12.11	2
	3	一种固-固相变纤维的制备方法及应用	申请	202211586448.7	2022.12.09	3
	4	一种本征柔性智能热管理相变纤维的制备方法、本征柔性智能热管理相变纤维及应用	申请	202411580510.0	2024.11.06	2
	5	一种复合相变纤维的制备方法、复合相变纤维及其应用	申请	202411580470X	2024.11.06	2
	4、获奖情况：					
	序号	奖励名称	奖励等级	授奖单位	奖励年度	排序
	1	中国科学院大学三好学生	校级	中国科学院大学	2022	
	2	博士研究生国家奖学金	国家级	中华人民共和国教育部	2024	
	3	延长石油企业奖学金	校级	中国科学院大连化学物理研究所	2024	
	4	中国化学会第 21 届全国热力学和热分析学术会议 青年论坛奖	国内会议	中国化学会	2024	
博士后研究题目：高性能柔性相变纤维制备及热管理应用研究						

博士 后 工 作 的 研 究 计 划	(简述研究计划的可行性、先进性和创新性, 理论和现实意义) 1. 研究意义 人类居住环境的不断改善与科学技术的飞速发展紧密相关。随着人们对高品质生活的不断追求, 越来越多的能源被消耗用于建筑物温度控制; 据不完全统计, 目前用于建筑物控温的空调等设备消耗的电力约占全球总电力的 15%, 而由此产生的碳排放进一步加剧了环境恶化与极端天气频发。因此, 发展高效低能耗的人居温控技术成为当前能源与环境研究领域的前沿课题。人体热管理技术, 能够针对人体及其周围局部微环境进行温度调控, 不仅可避免室内环境整体温控而产生的巨大能耗, 而且能够不受时间与空间限制为人体提供适宜温度的微环境, 在未来人居环境改善与节能减排领域具有重要的应用前景。相变纤维是一种集相变储能材料与纺织技术于一体的智能调温纤维, 可随外界温度变化自动触发相变储能材料相变过程, 在恒定相变温度下向人体环境吸收或释放大潜热, 实现对人体的智能化热量管理与温度控制, 成为当前人体热管理研究领域备受关注的智能调温功能材料。 早在 20 世纪 80 年代, 美国航空航天局就已开发出了这种具有智能调温功能的相变纤维, 用于在太空极端温度环境下对人体进行热量管理; 后来相变纤维应用逐步拓展到民用领域, 在人体热管理技术中展现出巨大的应用前景。然而, 当前相变纤维中普遍采用的调温介质为固-液相变材料, 其自身的固态强刚性与液态易流动性使得相变纤维制备技术极具挑战性。虽然目前发展的微胶囊或多孔载体包覆技术能够在一定程度上解决这些问题, 但是无法获得兼具高储热密度与高柔性的相变纤维, 成为限制相变纤维在人体热管理领域实际应用的技术瓶颈。 聚合物基交联型固-固相变材料与固-液相变材料的相变形式不同, 在相变时, 聚合物内部的交联网络中硬段(扩链剂等)不发生相变, 从而保持整个网络骨架结构稳定; 软段(相变单元)在加热过程中因两端受到硬段的限制从而不会转变为液相, 相变为另一个半结晶或非晶相。因此, 聚合物基交联型固-固相变材料是一种从外观表现出从固相到固相转变的柔性相变材料, 在相变过程中可以维持固相形态, 不会发生液体流动以及泄漏。此外, 得益于此类高聚物内部软硬段交替的结构, 该类型固-固相变材料具有本征的高柔性, 相比于固-液相变材料柔性得到了大幅提升。因此, 通过开发本征柔性的固-固相变材料, 并通过纺丝技术制备固-固相变纤维是一条可行且优异的制备策略。 2. 研究计划及内容 博后期间聚焦相变纤维的本征柔性化与智能调温性能协同调控难题, 围绕聚合物网络拓扑结构设计与相变行为响应机制展开研究。通过构建“网络结构设计-纤维成型工艺-多尺度性能表征与动态模型建立”三位一体的研究体系, 阐明“聚合物网络结构-热力学性质-纤维力学性能”的多因素耦合规律。具体研究内容如下: (1) 本征柔性固-固相变聚合物网络拓扑结构设计 with 调控 基于脂肪族化合物(醇/酸/胺)的官能团反应活性特征, 建立相变基元结构参数(碳链长度/支化度/极性基团)与网络交联密度之间的定量关系模型。采用梯度缩聚策略调控交联剂(二异氰酸酯/环氧化物)与扩链剂(丙三醇/聚己内酯)的摩尔比, 构建具有多级弛豫特性的聚合物交联网络拓扑结构, 实现相变焓值($\geq 100 \text{ J/g}$)与柔韧性的协同提升, 获得具有易操作、可放大的制备技术。 (2) 纤维连续化成型工艺开发与结构调控 建立相变聚合物溶液流变特性与湿法纺丝工艺参数的映射关系。通过多级凝固浴调控和动态拉伸取向实现纤维内部网络拓扑结构的有序排列, 同步提升能量密度($>100 \text{ J/g}$)、本征柔韧性和机械强度(1000 次弯曲后焓值保持率$>90\%$, 拉伸强度保
--	--

持率>90%)。同时,开发熔融纺丝辅助技术解决高交联度聚合物加工难题。 (3) 多尺度结构-性能关联机制解析与相变过程动态响应模型构建 通过精密量热与热分析技术表征材料的相变性质,揭示相变纤维内部的聚合物网络拓扑结构与热力学性质间的构效关系;发展原位多场耦合表征方法,结合原位 XRD、原位 FT-IR、原位万能试验机和原位偏光显微镜(POM),跟踪纤维在相变过程中内部相变单元的结构变化,揭示应力诱导的分子链取向机制以及温度对纤维内部聚合物网络中相变单元的关联规律,阐明相变单元在升/降温过程中结构变化对相变纤维强度的影响机制;使用原位同步辐射 SAXS/WAXS 探究拉伸过程中纤维内部聚合物网络的拓扑结构取向,建立结构取向度与纤维性质之间的关联规律,为高强度相变纤维的制备和合成提供理论指导;结合分子动力学模拟,探究相变过程聚合物结构变化机制,建立纤维内部网络结构在相变过程中动态变化模型,为进一步优化聚合物网络拓扑结构以及制备高性能本征柔性相变纤维提供理论指导。 3. 可行性 (1) 设计思路切实可行。基于本征柔性固-固相变材料的设计理念,从根本上避免熔点以上时固-液相变材料液相流动问题以及克服固相强刚性的难点,充分发挥了聚合物网络高柔性和相变时形状稳定的特点。通过调控聚合物网络中相变单元的分子链长度以及聚合度,有望实现热力学性质可调控的相变材料的开发。结合纺丝技术,可设计与制备出与智能调温纤维相适应的高储热密度、高柔性相变纤维,避免了传统相变纤维微胶囊脱落、相变温度以下刚性强以及相变温度以上易泄漏问题。因此,开发本征柔性固-固相变纤维可极大提升和解决目前相变纤维的诸多难题,本项目中高性能智能调温固-固相变纤维的设计与开发是可行的。 (2) 研究方案切实可行。申请人在化学合成制备固-固相变材料以及湿法纺丝制备相变纤维方面积累了丰富的经验。在纤维开发方面,发展了一种通过离子交联绿色、简易制备柔性相变纤维的策略,提升了相变纤维的相变焓,最高达 113 J/g (ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13, 1, 267-275);提出了一种通过湿法纺丝结合冷冻干燥技术制备石墨烯-氮化硼基的相变纤维膜的策略,实现了结构稳定相变纤维膜的开发 (Nano-Micro Letters, 2023, 15, 29)。在固-固相变聚合物材料制备方面,所在课题组从聚合物网络结构出发,成功制备出一系列柔性相变膜,极大改善了固-液相变材料的刚性和泄漏问题 (Energy Storage Materials, 2021, 34, 508-514; Advanced Functional Materials, 2023, 33, 2212259)。后续,在此基础上,以聚乙二醇作为相变核心单元,异氰酸酯为交联剂,成功制备出本征柔性固-固聚氨酯相变纤维,相变温度在 35℃ 范围内可调控,相变焓可达 65 J/g (Angewandte Chemie International Edition, 2024, e202408857)。 (3) 预研基础证实可行。在前期的实验基础上,申请人进一步的进行了一系列本征柔性相变纤维的制备及性能调控预研工作。分别以聚乙二醇、异氰酸酯和丙三醇为原料,通过调控摩尔比,制备了不同聚合度的柔性相变纤维。此外,经过热力学性质测试发现,该系列纤维的相变焓值在 24℃ 至 40℃ 范围内可调控,对应的相变焓值约为 48 J/g 至 103 J/g。初步证明了通过调控化学反应过程并结合湿法纺丝策略,可调控聚合物网络,制备出不同热力学性质的本征柔性固-固相变纤维。 (4) 研究条件切实可行。申请人长期从事高性能相变材料及纤维的可控制备及其在可穿戴智能调温领域的应用研究,围绕材料设计、纺丝液调控、纤维开发及其人体热管理系统耦合开展系统工作。迄今为止,共发表学术论文 26 篇,其中第一作者论文 5 篇 (IF>15 的论文 3 篇),申请发明专利 7 项,授权 1 项。本人现在中国科学院大连化学物理研究所史全研究员团队,实验室配备了完备且先进的精密量热、热分析
--

	与热物性仪器，可完全满足本项目提出的各种热力学行为研究需求。而且，与中国科学院大连化学物理研究所的吴忠帅研究员团队一直保持着密切的合作，共同开展本征柔性固-固相变纤维的研究工作。 4. 先进性和创新性 （1）聚合物交联网络设计调控理论及固-固相变纤维制备方案创新 从固-固相变聚合物网络结构设计出发，提出化学交联调控网络拓扑结构的策略，通过软段（相变单元）-硬段（扩链剂等）交替分布实现相变焓值与柔性的协同提升，结合纺丝技术开发本征柔性的固-固相变纤维，从根本上克服固-液相变材料的固态强刚性和液态流动性导致传统固-液相变纤维难以兼顾高储热密度与柔性的难题。 （2）多物理场耦合表征方法学创新及机制研究 发展基于精密量热等热分析技术和多尺度原位表征的耦合方法，揭示热力学性质与网络拓扑结构之间的关联规律，通过分子动力学模拟，建立相变过程中纤维内部聚合物网络结构的动态变化模型。 （3）全链条智能调控模型创新 结合理论计算，建立“网络结构→纺丝工艺→性能指标”的逆向设计框架，为设计与开发高性能固-固相变纤维提供理论指导。
本人承诺	本人承诺：申请表所填内容均真实可靠。对因虚报、伪造等行为引起的后果及法律责任均由本人承担。  本人签字：2025 年 7 月 22 日