



湍流驱动超细卷曲纤维的“超羽绒”材料制备及高效隔热

程泽堃¹, 黄浮嘉², 崔智文³, 赵善宇^{4*}, 赵立豪^{5*}, 伍晖^{1*}

1. 清华大学材料学院, 北京 100084

2. 清华大学未央书院, 北京 100084

3. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082

4. Swiss Federal Lab of Material Science and Technology (Empa), Duebendorf, Zurich, CH 8600, Switzerland

5. 清华大学航天航空学院, 北京 100084

* 联系人, E-mail: Shanyu.Zhao@empa.ch; zhaolihao@tsinghua.edu.cn; huiwu@tsinghua.edu.cn

Biomimetic highly curled nanofibers: highly efficient thermal insulation and sustainable materials driven by GHTS technology

Zekun Cheng¹, Fujia Huang², Zhiwen Cui³, Shanyu Zhao^{4*}, Lihao Zhao^{5*} & Hui Wu^{1*}

¹ School of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Weiyang College, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³ College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

⁴ Swiss Federal Lab of Material Science and Technology (Empa), Duebendorf, Zurich, CH 8600, Switzerland

⁵ School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding authors, E-mail: Shanyu.Zhao@empa.ch; zhaolihao@tsinghua.edu.cn; huiwu@tsinghua.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2025-5370

在全球能源供应紧张与环保诉求日益迫切的当下, 研发高效且环保的保温材料已成为科学界的重要课题. 传统羽绒等保温材料虽保暖性能优异, 却因依赖大规模水禽养殖而面临严峻的可持续性挑战. 养殖过程中, 不仅要消耗大量资源, 对环境造成污染^[1], 还引发了关于动物福利和可持续发展的争议^[2]. 在此背景下, 高性能的人工仿生保温材料, 尤其是具备卓越可持续性和高效隔热性能的纳米纤维结构材料, 成为了新一代热防护服装的突破口. 近期, 清华大学与瑞士联邦材料科学与技术研究院在这一领域取得了重大突破, 相关成果发表于 *Nature Sustainability*^[3].

在自然界漫长的进化历程中, 许多动物进化出了独特的毛发形态^[4]. 以安哥拉山羊为例, 它们栖息于土耳其安纳托利亚高原, 那里的冬季异常寒冷, 气温可低至 -36°C ^[5]. 安哥拉山羊的毛发天生卷曲, 这些卷曲的毛发相互交织, 构成了复杂的空间结构, 大幅提升了毛发层的蓬松度与孔隙率. 交织的卷曲毛发能有效阻滞空气流动, 形成稳定的隔热层, 从而显著降低热量传导效率, 帮助山羊在极寒环境中维持体

温^[6]. 这种精妙的生存智慧为我们带来了宝贵启示: 通过模拟这种卷曲纤维结构, 有望研发出具备高效隔热性能的人工材料.

在材料科学领域, 超细纤维海绵材料凭借其高孔隙率、超低密度及优异的热阻性能, 在高效保暖领域展现出巨大潜力. 研究发现, 若能有效提升超细纤维的卷曲程度, 其隔热性能与力学特性还能得到进一步优化. 因此, 研发可大规模制备具有高均匀性卷曲结构超细纤维的技术, 不仅对推动功能性保暖材料的创新发展具有重要科学价值, 更为高性能隔热材料的工业化应用提供了关键技术支撑.

然而, 传统纤维纺丝技术存在固有局限, 给高卷曲结构纳米纤维的制备带来诸多挑战. 在传统方法中, 当气流穿过单个障碍物时, 射流从层流转变为湍流不仅耗时较长, 且形成的湍流均匀性欠佳^[7]. 为突破这一技术瓶颈, 我们创新性地研发出网格诱导均匀湍流纺丝系统(简称GHTS). 该系统借助多孔网格诱导产生高强度的均匀湍流, 为制备高均一性的超细卷曲纤维营造了独特的流场环境. 具体而言, 在GHTS系

引用格式: 程泽堃, 黄浮嘉, 崔智文, 等. 湍流驱动超细卷曲纤维的“超羽绒”材料制备及高效隔热. 科学通报

Cheng Z, Huang F, Cui Z, et al. Biomimetic highly curled nanofibers: highly efficient thermal insulation and sustainable materials driven by GHTS technology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, doi: 10.1360/CSB-2025-5370

统中(图1(a)), 纺丝孔阵列兼具气流通道与纺丝溶液存储的功能, 高速气流冲击纺丝溶液膜使其破裂并在网格壁形成纺丝锥点; 随着滚筒转动, 纺丝溶液被持续送入高速气流, 再经网格孔阵列喷出, 最终实现高曲率纳米纤维(简称HCNFs)的高效生产. 同时, 气流通过高密度多孔网格障碍物时, 层流经纺丝孔阵列后会演变为各向同性网格诱导均匀湍流(GHT)(图1(i)), 这种由网格壁诱导形成的均匀湍流, 一方面加速了

溶剂蒸发, 另一方面增强了纤维的振荡、卷曲与折叠^[8], 显著提升了纤维的卷曲度及材料的孔隙率, 进而实现了HCNFs的规模化生产.

计算流体力学模拟结果显示, 气流穿过格栅形成的均匀湍流中, 存在着多尺度且具有强烈随机脉动的涡旋结构. 这些涡旋会对超细纤维产生显著的拉伸与弯曲作用, 促使纤维形成高度卷曲的形态. 这种高度卷曲的纳米纤维构建起了高

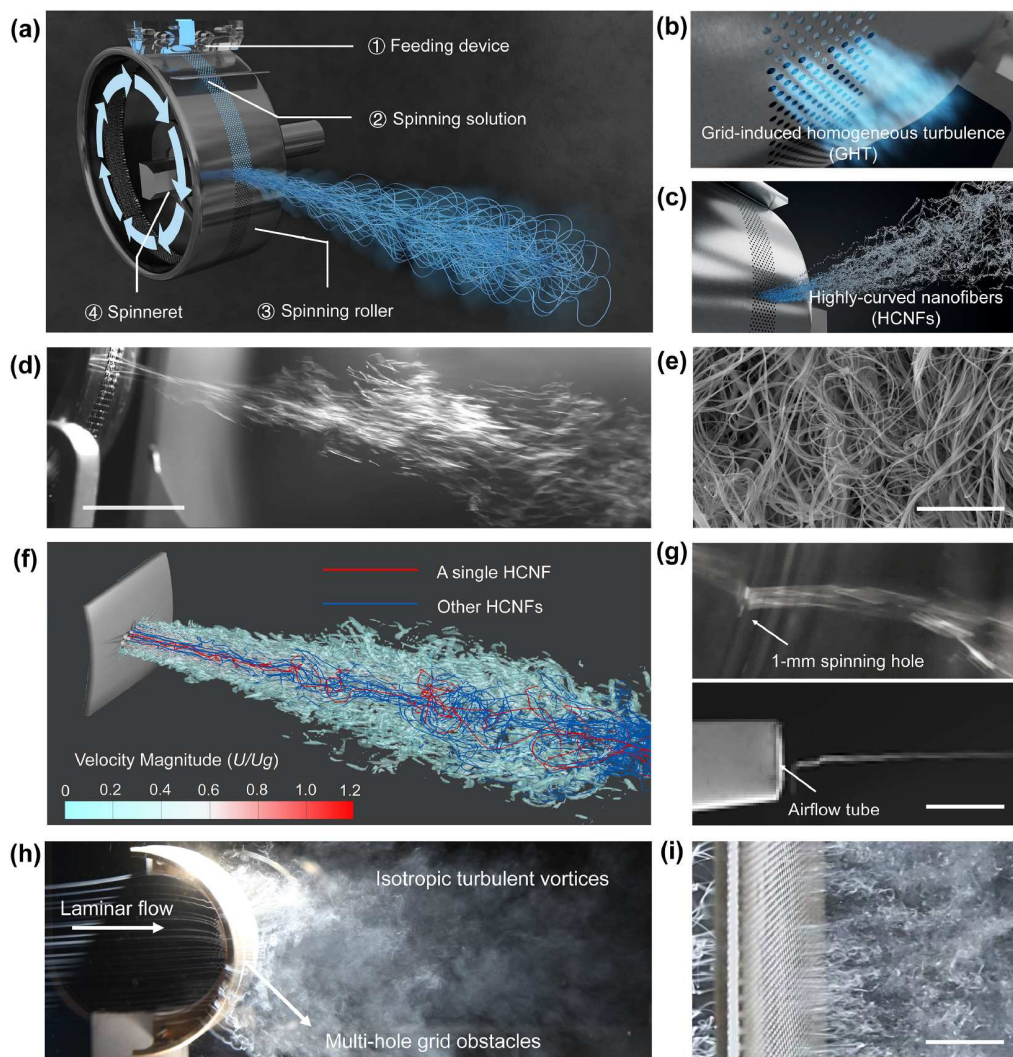


图 1 (网络版彩色)GHTS装置生成的湍流诱导弯曲纳米纤维. (a) GHTS 装置示意图; (b) 网格诱导均匀湍流(GHT)形成的示意图; (c) GHTS装置大规模生产HCNFs的示意图; (d) GHTS 系统制备HCNFs的高速摄像图像(比例尺: 20 mm); (e) GHTS系统生产的HCNFs的扫描电子显微镜(SEM)图像. 比例尺: 20 μm . (f) GHT作用下气流速度与纳米纤维卷曲的计算流体力学(CFD)模拟结果(U 为实际速度, U_g 为气流喷嘴出口平均速度); (g) 相同能耗下GHTS与溶液吹纺(SBS)系统纺丝溶液射流对比(比例尺: 5 mm); (h), (i) 流场可视化图像(比例尺: 1 cm)^[3]. Reproduced with permission from Springer Nature

Figure 1 (Color online) Turbulence-induced curved nanofibres produced by GHTS device. (a) Schematic of GHTS device; (b) schematic of grid-induced homogeneous turbulence (GHT) formation; (c) schematic of large-scale HCNFs production via GHTS device; (d) high-speed video image of HCNFs fabricated by GHTS system (scale bar: 20 mm); (e) SEM image of HCNFs produced by GHTS system (scale bar: 20 μm); (f) CFD simulation results of airflow velocity and nanofibre curling under GHT (U : actual velocity, U_g : average velocity of airflow nozzle orifice); (g) comparison of spinning solution jet between GHTS and solution blow spinning (SBS) systems under the same energy consumption (scale bar: 5 mm); (h), (i) flow field visualization images (scale bar: 1 cm)^[3]. Reproduced with permission from Springer Nature

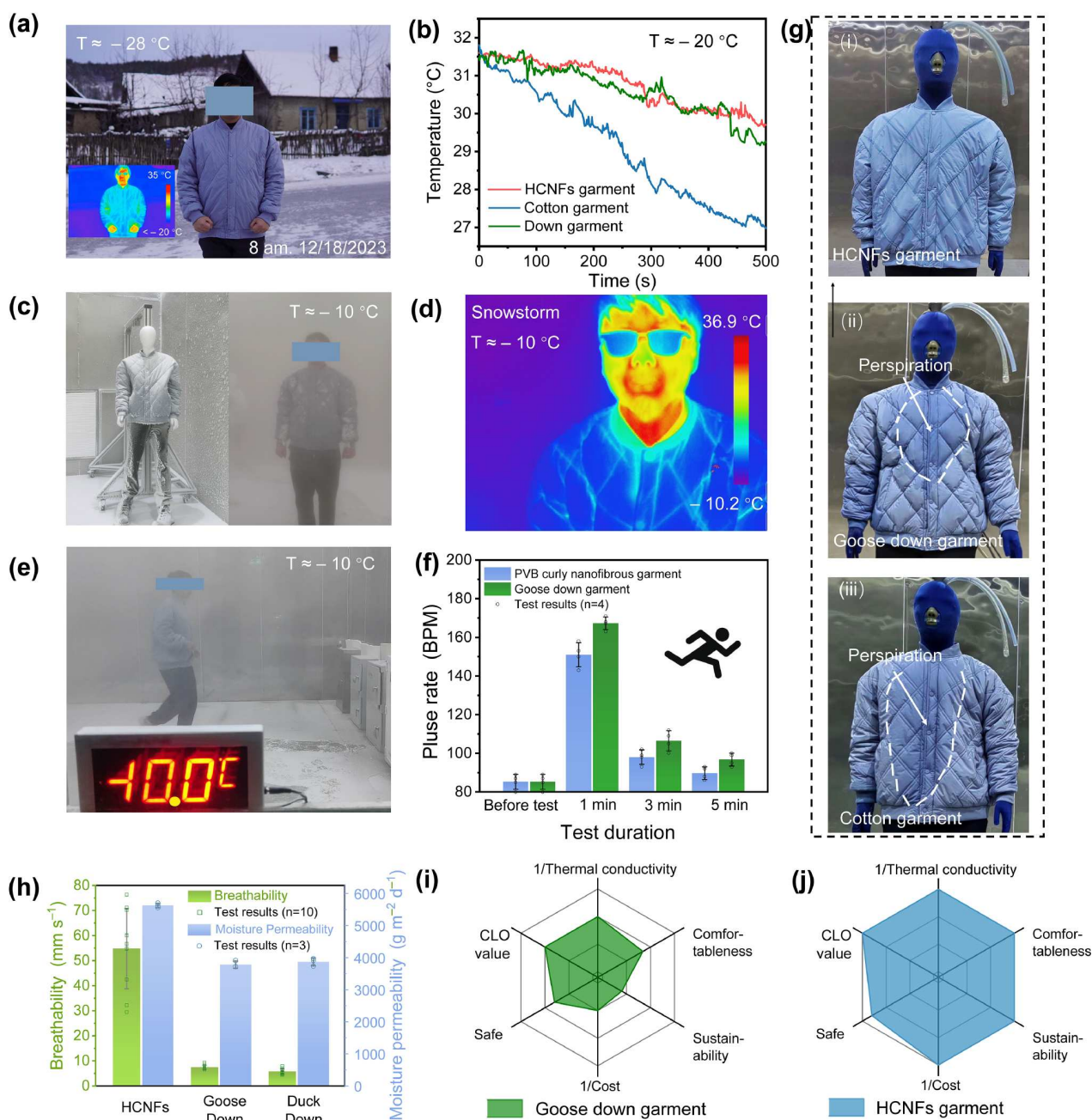


图 2 (网络版彩色)超保暖纳米纤维服装。(a) -28°C 高纬度地区(北纬 53.5°)穿着HCNF服装的光学图像及红外热像图;(b) -20°C 环境下不同厚度服装(HCNF、棉质、850蓬松度鹅绒)的温度传感实验;(c)出汗假人法与暴风雪条件真人试验评估HCNF服装保暖性;(d) -10°C 暴风雪条件下穿着HCNF服装的红外热像图;(e) -10°C 暴风雪条件下穿着HCNF服装的运动记录;(f)穿着鹅绒与HCNF服装的运动后心率变化分析($n=4$, 平均值 $\pm$ 标准差);(g)不同保暖服装汗液浸泡实验的防水性评估;(h) HCNF服装内衬与鹅绒、鸭绒的透湿性($n=3$, 平均值 $\pm$ 标准差)及透气性($n=10$, 平均值 $\pm$ 标准差)对比;(i), (j) 鹅绒服装与HCNF服装的六维性能对比分析^[3]。Reproduced with permission from Springer Nature

Figure 2 (Color online) Superthermal nanofibrous garment. (a) Optical image and infrared thermogram of individual wearing HCNF garment at -28°C in high-latitude region (53.5°N); (b) temperature sensing experiment of garments with different thicknesses (HCNF, cotton, 850-FP goose-down) at -20°C ; (c) heat retention evaluation of HCNF garment via sweating manikin method and real-life trials under snowstorm; (d) infrared thermal image of individual in HCNF garment under -10°C snowstorm; (e) documentation of physical activity in HCNF garment under -10°C snowstorm; (f) post-exercise heart rate variation analysis of individuals in goose-down and HCNF garments ($n=4$, mean $\pm$ s.d.); (g) waterproofness assessment of different thermal garments under sweat immersion experiment; (h) comparison of moisture permeability ($n=3$, mean $\pm$ s.d.) and breathability ($n=10$, mean $\pm$ s.d.) between HCNF garment lining, goose down and duck down; (i), (j) six-dimensional performance comparative analysis of goose-down garment and HCNF garment^[3]. Reproduced with permission from Springer Nature

效的保暖结构——其超细的卷曲形貌不仅提高了纤维组装材料的孔隙率、减少了固体成分占比，还延长了热传导路径、增强了界面热阻，从而有效降低了热桥效应^[9,10]。同时，纤维组装结构中形成的封闭或半封闭气穴能够阻碍空气流动，显著抑制对流传热^[11]。不仅如此，卷曲结构还能吸收和分散外力、扩大接触面积，进而提升材料整体的机械稳定性。经中国质量认证中心检测，HCNFs具有良好的环境友好性，在矿产资源稀缺性、土地利用、生态毒性、水资源消耗和人体毒性等14项指标上均展现出可持续性优势，其中8项指标的环境影响仅为羽绒的5%以下。

从热传导的基本原理分析，HCNFs之所以具备优异的隔热性能，高孔隙率是核心因素之一。依据传热学理论，热量传递主要通过热传导、热对流和热辐射三种途径实现。在HCNFs中，大量微米级封闭气穴的存在限制了空气的对流运动，从而减少了对流传热；同时，纤维的卷曲结构大幅延长了热量在固体中的传导路径，降低了热传导效率；此外，纳米尺度的纤维还能对热辐射产生散射作用，进一步减少热量损失。

为了量化这种结构与性能的关系，我们开发了卷曲纳米纤维孔隙率模型(CNPM)。该模型以圆堆积理论为基础，将孔隙率定义为三维单元中未被纤维占据的体积(不包含卷曲纤维形成的扇形区域)。模型结果显示，纤维的卷曲角度越大，越容易“脱离”网格结构，进而减少占据面积、提高孔隙率，其中以20 μm长度上的卷曲角度作为主要输入参数。这一模型为理解HCNFs的结构对隔热性能的影响提供了定量依据。

同时，我们借助斯塔克-弗里克基础模型(SFBM)^[12]，对聚乙烯醇缩丁醛(PVB)纤维材料的热导率各组分贡献及总热导率随体密度的变化规律进行了模拟。结果显示，总热导率呈现出U形曲线特征：在低密度区间数值较高，当体密度处于10~16 mg cm⁻³时达到27.60 mW m⁻¹ K⁻¹的最小值，而当体密度超过30 mg cm⁻³后则逐渐增大。这一模拟结果与实验数据吻合，从理论层面印证了HCNFs在不同密度条件下的隔热性能变化规律。

值得关注的是，密度与孔隙率并非相互独立的参数，二者通过公式 $P(\%) = (1 - \rho/\rho_0) \times 100\%$ 存在明确关联(其中 P 为孔隙率， ρ 为体密度， ρ_0 为固相密度)。据此计算，HCNFs的密度

对应的孔隙率为99.51%，这与X射线纳米计算机断层扫描(X射线nano-CT)测得的99.60%一致，进一步验证了模型的可靠性。

这种高性能卷曲纳米纤维材料有望成为可持续的下一代保暖服装内衬，替代传统羽绒填充，从而减少对动物饲养、屠宰等环节的依赖。将羽绒替换为该材料后，搭配罗纹面料作为外层，即便在极寒环境中仍能提供卓越的保暖性能。暖体假人测试结果显示，该材料单位厚度的克罗值是850蓬松度白鹅绒的两倍以上，展现出出众的御寒能力。在-20℃环境实验中(图2(b))，8.90 mm厚的HCNF服装使参与者体温从31.60℃降至29.72℃，保暖效果与18.45 mm厚的850蓬松度鹅绒服装相当，而厚度相近的棉质服装则使体温降至27.04℃，进一步印证了HCNF材料的高效隔热性能。

此外，与鹅绒、鸭绒相比，HCNF服装内衬在透湿性和透气性上表现更优(图2(h))，可减少穿着时的闷热感。超细纤维结构产生的气流滑移效应有效提升了材料的透气性和透湿性，显著改善了穿着时的舒适度^[13]。从流体力学角度分析，HCNFs的平均直径为199 nm，而常温下空气分子的平均自由程约为68 nm，此时克努森数(Kn)为0.684，处于过渡流态($0.25 < Kn < 10$)。在这种流态下，气体分子与纤维表面的滑移效应显著，使得空气和水分子能更顺畅地通过纤维结构，这也正是HCNFs具备优异透气性和透湿性的原因所在。

国家纺织品服装服饰产品质量检验检测中心(广州)的耐久性测试结果进一步证实，该材料在防油性、耐光性、抗水压性、紫外线防护、抗螨性及防霉等级等七项关键指标上均表现优异，具备良好的耐久性和健康保障性能，适合长期使用。

这些结果表明，HCNFs在推动下一代高性能可持续隔热材料发展方面蕴藏着巨大潜力。除了服装领域，其高孔隙率与复杂曲折的结构还赋予了它在其他领域的多功能应用前景，例如过滤、催化、海水淡化以及生物医学止血等场景。展望未来，若将先进的人工智能技术融入生产过程，有望进一步提升生产效率、优化材料可回收性并加强成本控制，从而为这一受生物启发的材料平台实现智能化、规模化应用铺平道路。

推荐阅读文献

- 1 Zhou Y, Bao W, Yan F, et al. Carbon footprint and water footprint assessment of down jackets. *AATCC J Res*, 2023, 10: 300–310
- 2 Kozák J, Gara I, Kawada T. Production and welfare aspects of goose down and feather harvesting. *Worlds Poultry Sci J*, 2010, 66: 767–778
- 3 Cheng Z, Cui Z, Li Z, et al. Biomimetic nanofibres for sustainable thermal insulation. *Nat Sustain*, 2025, 8: 957–969
- 4 Cadieu E, Neff M W, Quignon P, et al. Coat variation in the domestic dog is governed by variants in three genes. *Science*, 2009, 326: 150–153
- 5 Emsen I M. The approach to frostbite in Turkey: a retrospective study. *Can J Plast Surg*, 2006, 14: 21–23
- 6 Lasisi T, Smallcombe J W, Kenney W L, et al. Human scalp hair as a thermoregulatory adaptation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120: e2301760120
- 7 Li Z, Cui Z, Zhao L, et al. High-throughput production of kilogram-scale nanofibers by Kármán vortex solution blow spinning. *Sci Adv*, 2022, 8:

eabn3690

- 8 Thoppey N M, Bochinski J R, Clarke L I, et al. Edge electrospinning for high throughput production of quality nanofibers. [Nanotechnology](#), 2011, 22: 345301
- 9 Finefrock S W, Wang Y, Ferguson J B, et al. Measurement of thermal conductivity of PbTe nanocrystal coated glass fibers by the 3ω method. [Nano Lett](#), 2013, 13: 5006–5012
- 10 Zeng X, Sun J, Yao Y, et al. A combination of boron nitride nanotubes and cellulose nanofibers for the preparation of a nanocomposite with high thermal conductivity. [ACS Nano](#), 2017, 11: 5167–5178
- 11 Ramzan M, Rafiq A, Chung J D, et al. Nanofluid flow with autocatalytic chemical reaction over a curved surface with nonlinear thermal radiation and slip condition. [Sci Rep](#), 2020, 10: 18339
- 12 Stark C, Fricke J. Improved heat-transfer models for fibrous insulations. [Int J Heat Mass Transfer](#), 1993, 36: 617–625
- 13 Zhang Z, Liu B Y H. Experimental study of aerosol filtration in the transition flow regime. [Aerosol Sci Tech](#), 1992, 16: 227–235