DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.1995.01.006

多孔介质传热传质研究的进展与展望

施明恒

（东南大学工程热物理研究所，南京 210018）

［**摘要**］　本文介绍国家自然科学基金资助的多孔介质传热传质研究动态和近年来所取得的进展，探讨未来还需要继续研究的一些有意义的方向和内容。

［**关键词**］　多孔介质，传热传质，迁移特性，渗流，相变

1　我国多孔介质传热传质研究的重大进展

多孔介质传热传质是地球资源环境科学技术这一新的交叉学科领域中具有重要意义的一项基础性研究，对能源、资源、环境和生物以及工农业生产有着重要的应用前景。国家自然科学基金会工程热物理学科于1993年在对重点项目“多孔介质传热传质的基础研究”及一批涉及多孔介质传热传质过程的面上项目进行中期检查和评估的同时，对多孔介质传热传质领域未来的研究方向、目标和任务进行了深入研讨。评估表明，我国在多孔介质传热传质研究中取得了可喜的进展，一批研究成果已接近或处于国际先进水平。概括起来，这些进展大致可分为如下几方面

（1）发展了考虑毛细滞后的未饱和多孔介质传热传质理论。未饱和含湿多孔介质中的传热传质过程，由于存在毛细滞后而变得十分复杂，给定量研究带来了极大的困难，是多孔介质传热传质研究中的一大难题。虽然从30年代起国外就有许多学者从事毛细滞后的研究，但也一直停留在定性研究阶段。近年来，我国在毛细滞后的研究方面已取得突破性的进展[1-4]，从理论上对毛细滞后的成因提出了新的见解，建立了毛细多孔介质等温渗流的阈梯度理论和毛细滞后准则，从而实现了对毛细滞后现象的定量描述。在此基础上，导出了考虑毛细滞后现象的未饱和多孔介质传热传质微分方程组，揭示了传统理论中所包含的各种热湿迁移特性具有多值性的物理基础。这一理论上的突破，将对未饱和多孔介质传热传质理论的发展产生重大的影响。此外，模型还考虑了温度对毛细压力和物性参数的影响。

（2）发展了新的多孔介质热湿迁移特性的测试理论和方法。多孔介质热湿迁移特性的正确测定，是多孔介质传热传质实验研究中的一个关键。由于多孔介质结构的复杂性以及热湿迁移机制的多样性，使得迁移特性的测试十分复杂而且测试精度不高。我国在多孔介质热湿迁移特性新的测试原理和方法方面已取得了重大的进展[5-7]，提出了一种快速、准确、多功能热湿迁移特性的测试方法，并正在向实用化方向发展与完善；发展了电容法测量平均和局部湿含量的测湿技术；发展了测定局部湿含量的脉冲电导法，研制成功脉冲电导测湿传感器。局部湿含量的方便、正确测定，将对多孔介质热湿迁移规律的实验研究开辟一条新路。

本文于1994年5月7日收到。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(3) 在多孔介质对流和相变传热传质研究中，取得了一系列开创性成果。多孔介质中对流和相变传热具有广泛的工程应用背景和重大的理论意义，是多孔介质传热传质研究中的一个热点。通过深入的理论和实验研究，已在下列几个方向上取得了重大进展：获得了充填多孔介质的通道进口段对流换热的湍流效应和热边界层的发展规律；考虑热弥散、变物性及浮升力的影响后，建立了充满多孔介质的竖直套管内受迫和混合对流的流动和传热模型[8]；对多孔表面和微型结构内流体流动和传热的现象进行了探索性的实验研究，发现了一系列有别于传统规律的特性和现象[9]，对进一步发展高效微细结构沸腾强化与冷却技术具有重要价值；建立了多孔表面沸腾和凝结的强化传热物理模型，发展了一种基于多孔体弥散效应的管内换热强化技术，强化效果在国内外处于领先地位；发展了饱和含湿多孔介质中固液相变传热的新的实验方法和实验模拟技术；研究了非饱和含湿多孔介质中冻结和凝结的耦合传热效应[9]；发展了外部加热条件下冷冻干燥过程的不可逆热力学模型并定量地分析了传热传质之间的交叉效应；获得了某些典型国产物料（谷物、煤炭、瓜果）干燥脱水过程的传热传质规律。这些进展和成果，将对我国国民经济的发展起到促进作用。

(4) 高温条件下，多孔介质中的流动、扩散、燃烧和化学反应方面的传热传质研究工作取得了重要进展。动力用煤基本微观结构及其与燃烧特性的相互关系方面的研究，对我国燃煤技术的发展有重要影响，这项研究已取得阶段性成果；多孔陶瓷中预混火焰传热模型的建立，为我国多孔体辐射燃烧技术的发展提供了理论基础；首次将多孔介质逾渗的概念引入对气固相反应的模化中，建立了流化床锅炉中脱硫反应的逾渗模型，揭示了循环脱硫的机理，对循环流化床锅炉的设计和脱硫运行具有指导意义。

(5) 发展了基于多孔介质模型的工程热物理问题的分析方法。提出了紧凑式换热器的多孔介质模型和相应的设计计算方法。这项创新的研究，将对换热器的强化与优化设计具有重要的应用价值。

除以上成果外，结合研究工作还培养了一批优秀的中青年科技人才，为今后进一步系统深入的研究，打下了坚实的基础。

2 多孔介质传热传质研究的展望

从广义上讲，当多孔体孔隙率为 0 时，即为通常的固体；当孔隙率为 1 时，则为通常的流体，在 0－1 之间的孔隙率的物质，均可视为多孔体。因此，多孔介质传热传质与工业、农业、能源、资源、航天、地质、材料、化工、建筑、环境和生命科学的各个领域有着密切的联系。多孔介质传热传质的研究涉及到多个基础与技术学科，有助于促进跨学科和边缘学科的形成和发展[10]。可以预见，在今后相当长的一段时间内，甚至在下一世纪中，多孔介质传热传质将继续作为工程热物理领域的一个重要研究课题而得到发展和深化，并将对工农业的发展和社会的进步产生重大的影响。

纵观国内外的发展态势，未来多孔介质传热传质的研究将会着重在下列几个方面：

(1) 继续从宏观和微观的不同角度，通过理论分析、实验研究和数值模拟，深入研究多孔介质内复杂的流动、传热和传质机制；着重探索各物理场之间的交叉效应，研究变物性、各向异性以及多相多组分和非牛顿流体在多孔介质中的迁移规律；研究毛细滞后、胀缩效应、多孔结构与孔隙分布、非 Darcy 效应和耗散效应等对迁移过程的影响。与此相对应，发展新型的

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

多孔介质热物理参数的测试原理与技术。这些研究将大大推进多孔介质传热传质理论的发展并使多孔介质传热传质的理论模型与实际过程符合得更好。

(2) 强化直接面向工农业生产和对社会进步具有重大影响的多孔介质传热传质应用基础课题的研究，是今后若干年内的主攻方向。在这一领域内比较有意义的应用基础研究有：地下稠油热采、冻土工程与融化处理、沙漠水资源勘探和有效利用、盐碱和污染源在土壤中和地下含水层中的扩散和防扩散、地热能的开发与利用、地下贮能和地下建筑工程、多孔功能材料的开发和应用、新型高效节能干燥技术、原煤预加工过程和煤层煤堆自燃预报技术、多孔辐射燃烧技术、高效颗粒床反应和催化过程、强化换热技术，等等。

(3) 生物体内多孔介质中的能量与物质的传递过程将是未来研究的热点之一。这将包括动物体内能量和物质传输机制和规律的探索，体内和体表温度场的预测和与之有关的热诊断、热治疗和热控制技术，人类居住环境和穿衣的热舒适控制和调节，水分、养分和肥料在土壤中和植物根茎枝叶中的运动、吸收和散发过程，粮食、蔬菜和瓜果细微结构中的传递过程，等等。所有这些将对生命科学和人类生存环境产生重大的影响。

(4) 从多孔介质作为一种宏观尺度上的虚拟连续体的假定出发，进一步发展基于多孔介质模型的工程热物理问题的分析方法。这是一种新的科学研究方法，比较有希望的有：超大规模集成电路中的热分析和强化冷却技术，紧凑式换热器的热模拟和优化设计，城市工业和人口密集区的大气环境预测等。

参 考 文 献

[1] W P Yu (虞维平), B X Wang (王补宣), M H Shi (施明恒). Modeling of Heat and Mass Transfer in Unsaturated Wet Porous Media with Consideration of Capillary Hysteresis. Int. J. Heat Mass Transfer, 1993, **36** (15): 3671—3676.

[2] 虞维平，王补宣，施明恒. 非饱和多孔介质毛细滞后的成因分析. 工程热物理论文集，西安交通大学出版社. 1990, 329—332.

[3] 虞维平，王补宣，施明恒等. 多孔介质非饱和渗流的的阈梯度理论. 工程热物理学报. 1992, **13** (1): 74—76.

[4] Wang B X (王补宣), Yu W P (虞维平). The capillary hysteresis and its properties for unsaturated wet parous media, Int. J, Fluid Phase Equilibrium, 1992, **75**: 197—212.

[5] Wang B X(王补宣), Yu W P(虞维平). A Method for Evaluation of Heat and Mass Transport Properties of Moist Porous Media. Int. J. Heat Mass Transfer, 1988, **31** (5): 1005—1009.

[6] 归柯庭，韩吉田，施明恒等. 测量松散颗粒物料局部湿含量的电容探针，东南大学学报. 1993, **23** (5): 110—114.

[7] 雷树业，包素锦，王维城等. 松散介质孔隙率与渗透率的测定. 工程热物理学报. 1992, **13** (4).

[8] 卞卫，王补宣. 含内热源多孔介质中的混合对流. 工程热物理学报. 1992, **13** (4).

[9] Peng, X F (彭晓峰), Wang, B X (王补宣). Forced Conrection and Flow Boiling Heat Transfer for Liquid Flowing Through Micro-Channels. Int. J. Heat Mass Transfer, 1993, **36** (14): 3421—3427.

[10] 王补宣. 多孔介质传热传质研究的意义和现状. 中国科学基金. 1991, (1): 32—34.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

RECENT DEVELOPMENT AND PROSPECT OF HEAT AND MASS TRANSFER IN POROUS MEDIA

Shi Mingheng

(*Southeast University*, *Nanjing* 210018)

Abstract Heat and mass transfer in porous media is one of the most interested research areas in the Thermal Science. It has been developed into a synthetical discipline in recent years. The state of the art of this field in China is summarized in this paper. Some interesting research areas in the future are discussed and forecasted.

Key words Porous medium, Heat and mass transfer, Transport properties, Infiltration, Phase change

·资料·

1994 年国家自然科学基金资助的前 20 所高等院校

（按资助金额排序）

金额单位：万元

单位名称	资助	
	项数	金额
清华大学	106	823.90
北京大学	93	703.10
南京大学	66	480.20
浙江大学	70	478.80
中国科学技术大学	61	434.20
复旦大学	55	407.55
北京医科大学	54	374.20
天津大学	49	367.20
北京农业大学	49	355.50
武汉大学	46	310.10
华中理工大学	42	305.10
南开大学	40	288.50
北京航空航天大学	39	274.80
上海第二医科大学	37	259.50
中国人民解放军第四军医大学	34	253.70
西安交通大学	35	242.30
上海医科大学	38	240.10
吉林大学	32	237.40
大连理工大学	31	237.00
厦门大学	35	236.70

（综合计划局信息处供稿）

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net