

前沿领域综述 —— 多孔介质强制对流换热研究进展

郑坤灿^{1)2)†} 温治¹⁾ 王占胜³⁾ 楼国锋¹⁾ 刘训良¹⁾ 武文斐²⁾

1) (北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

2) (内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

3) (包头北方创业股份有限公司, 包头 014010)

(2011年4月26日收到; 2011年8月16日收到修改稿)

多孔介质的强制对流换热主要涉及渗流、对流换热、热弥散和热辐射等方面的内容, 文中对这个几个方面的国内外研究进展和发展趋势进行了逐一综述. 同时对主要理论模型、实验研究和经验关联式进行了分类整理, 总结了它们的特点、适用范围和局限性, 并对主要研究成果进行了对比分析, 指出了将来进一步研究的方向和难点所在. 而且通过简化计算得到高温多孔介质冷却过程何时需要考虑辐射换热. 所有这些对多孔介质的理论研究和工程应用都具有指导性的意义.

关键词: 多孔介质, 对流换热, 渗流, 热弥散

PACS: 44.27.+g, 44.30.+v, 44.35.+c, 44.40.+a

1 引言

多孔介质的概念被广泛用于许多应用科学和工程领域, 包括力学(声学、地质力学、土壤力学和岩石力学)、地球科学(水文学、石油地质学、地球物理)、生物学及生物物理、材料科学、过滤、石油工程、生物修复、建筑工程、冶金和化工等.

个人认为, 多孔介质是宇宙万物的基本构架. 大到宇宙和星系本身, 星系和星云构成宇宙的骨架, 同时又由相对稳定的恒星支撑, 星际物质和电磁波穿行其间, 可以称为宇观多孔介质; 其次是宏观多孔介质, 如星球上的山系沟壑, 风水奔流而过, 以及身边堆积的沙石、土壤、工业原料和产品等等, 气可以通过, 水可以渗流; 还有, 尺度在微纳米范围的介观多孔介质, 像微米纳米的颗粒堆物体和微纳米材料等; 另外, 从构成物质的基本单位来看, 分子和原子构成物质骨架, 电磁波在其间的空隙中穿梭并与其相互作用, 这可以称为微观多孔介质. 因此, 对多孔介质的研究对于认识宇宙和物质的构形及构造具有深刻的意义, 多孔介质本身的科学规律可以

应用到天体流体力学及微观量子力学等领域, 或者反过来丰富多孔介质本身的理论内涵. 比如金属中电荷的运动, 透明材料中光的传播, 以及热在物质中的传递等都类似于流体在多孔介质中流过, 其中产生的阻力等特征具有广泛的共性, 可以提出一些综合性的研究课题.

多孔介质对流换热在化工、冶金、水泥、石油、核反应堆和航空航天都有着广泛应用, 比如化工填料塔的吸收过程、烧结矿的冷却过程、干熄焦过程、发汗冷却过程以及水泥和石灰熟料的冷却等等. 多孔介质对流换热过程非常复杂, 涉及渗流、接触导热、热弥散和热辐射, 有时还有相变, 而且这些过程往往相互耦合. 目前多孔介质对流换热的处理方式主要分为以下两种情况: 当多孔介质内没有流动或者只有缓慢流动, 且流固之间温差较小, 一般把多孔介质流固相按整体处理, 运用局域热平衡模型, 用等效热导率来描述其热传递的整体行为则可, 这部分详细的研究综述可以参阅郁伯铭的“多孔介质输运性质的分形分析研究进展”一文; 当流动较强, 流固间有一定温差, 主要考虑强制对流换热, 则需要运用局域非热平衡模型, 这需要分

† E-mail: zhengkunchan@yahoo.com.cn

别建立流体和固体相的守恒方程,同时考虑热弥散和热辐射,最终进行耦合求解.本文综述主要针对后一种情况,下面从多孔介质的渗流、对流换热、热弥散和热辐射几个方面加以阐述.

2 多孔介质的渗流研究进展

2.1 理论模型

自然多孔介质内部结构非常复杂,其颗粒骨架和孔隙的大小及空间分布是无序和随机的,与流体之间的耦合作用是非线性的,因此正如湍流一样,要建立严格或者准确的物理和数学模型来描述它目前几乎是不可能的.故多孔介质渗流理论模型仍然是建立在 1856 年达西模型基础上并经过不断修

正得到的经验理论模型,见表 1.

表 1 中可以看出多孔介质理论模型的发展历程,最早的达西模型认为渗流过程速度与压力遵从线性关系,这能够成功处理雷诺数较小时的渗流运动,达西模型形式简单易于理解,尽管有很大的局限性,人们还是愿意拿它作为多孔介质理论大厦的第一块砖;在此基础上,Forchheimer (1901 年)进一步实验研究发现达西模型只在 $Re_p < 10$ 时适用,否则压力与速度应遵守抛物线关系,于是与速度平方相关的惯性项被添加进达西模型,这便是 Darcy-Forchheimer 修正模型.实际上后来 (1997 年)有研究者^[1]通过实验指出,当流动进入湍流状态后 ($Re_p > 100$),非线性阻力与流速呈 3 次方关系,所以进一步的修正是有必要的.

表 1 多孔介质渗流模型的发展及主要特点

年份	数学模型	主要特点
1856	达西模型 ($Re_p < 10$)	考虑黏性阻力
1901	Darcy-Forchheimer 修正 ($Re_p > 10$)	考虑惯性力
1947	Darcy-Brinkman 修正(孔隙率较大时采用)	考虑有效黏性系数,相当于湍流黏性系数
1957	Darcy-Wooding 修正模型 ($Re_p > 1$)	考虑了惯性效应和加速度修正
1981/1998	Darcy-Brinkman-Forchheimer	考虑惯性力、黏性阻力、有效黏度、加速度和惯性效应

1947 年,Brinkman 可能从湍流模型中获得灵感,在达西模型中加入了有效黏性耗散项得到了 Darcy-Brinkman 修正模型,很多实验表明该模型在孔隙率较高时才正确^[2],而且有数值模拟^[3-5]表明,其有效黏性系数为分子动力学黏度时与实验结果符合得很好.因此,是否可以这样猜测,Darcy-Brinkman 修正模型开始是想采用有效黏度系数考虑多孔介质对渗流过程的类湍流强化,但结果在大孔隙率时其强化效果与分子扩散相近,加上本模型只对大孔隙率适用,那么这个修正是不是没有必要呢,这值得进一步的研究.

如果说上述 Forchheimer 和 Brinkman 只是对达西模型简单的经验修正的话,那么 1957 年 Wooding 就进行了一个大胆的举动,把 N-S 方程的形式引入了多孔介质渗流模型,考虑了加速度、惯性效应和压力梯度项,当然达西阻力是必须的.正是基于此,Vaifai 等^[6]和 Alkam 等^[7]才在对多孔介质微观流动 N-S 方程 Rev 平均基础上建立了 Darcy-Brinkman-Forchheimer 模型,该模型适用于复杂多孔介质流动,不过总的说来这样的模型依旧带有半

经验性质.

值得指出的是近年来一些研究者^[8-13]尝试通过格子玻尔兹曼方法 (LBM) 从微观统计得到类似 Darcy-Brinkman-Forchheimer 这样的模型与实际结果符合较好,是较有前景的多孔介质渗流理论研究新路子.然而对自然随机多孔介质而言,其典型的非线性特征可能更适于采用分形、混沌等非线性理论描述,这些方面已有一些激动人心的研究成果,比如多孔介质的构建^[14-17],流动特征的分形描述以及渗流分形关联式的获得等^[18-25].不过,多孔介质渗流问题的最终解决必然依赖于湍流难题的破解,当然其本身的研究也能促进湍流理论的完善与发展.

2.2 经验关联式和解析解

针对多孔介质渗流,各个行业各个学科领域通过实验获得了大量渗流经验关联式,其中比较常用的列在表 2 中.可以看出,最早的达西线性关联式只适于低雷诺数,Forchheimer^[26]提出了抛物

线关联式有了更好的精度. Kozeny-Carman^[27] 关联式在化工行业中有着广泛应用, 比如过滤等. Fair-Hatch^[28] 公式是根据量纲分析推出来的, 式中 β 为松散多孔介质的密度因子, 由实验确定为 5; α 为砂粒形状系数, 球形颗粒取 6, 有棱角颗粒取 7.7; P_m 为保留在相邻网筛的砂粒百分比; d_m 为相邻筛孔的几何平均值. 近年来, 分形理论在多孔介质渗流过程的应用体现出了较大的优越性, 郁伯铭^[29] 根据流体力学基本原理和分形理论推导得到了渗流分形解析解, 公式中不含任何经验常数, 仅通过多孔介质的分形维数、迂曲度维数和孔径或粒径等

参数即可求出. 该关联式虽然得到了一些实验的验证, 能否大范围推广还需要进一步研究. 当然, 目前应用最广的还是 Ergun 型方程^[30], 但该方程的使用首先要根据雷诺数将流动分为 Forchheimer 区和湍流区 (见表 3), 然后在不同区域 a 和 b 取不同的数值 (见表 4). 由表 4 看出, 不同研究者取值不同, 说明常数的取值因具体情况而异, 这个问题的本质需要进一步探索, 王英波等^[31] 走出了很有意义的一步, 把 Ergun 方程的系数与颗粒形状系数进行了关联, 不过 Ergun 方程的系数应该还与颗粒间的配位、团聚和所受作用力等都有关系.

表 2 多孔介质常用渗流关联式

作者	渗流关联式	特点
Darcy	$Q = KA \frac{H_1 - H_2}{L}$	应用广, 适于 $Re_p < 10$
Forchheimer ^[26]	$J = a + bv^2$	直接拟合 ($Re_p > 10$)
Kozeny-Carman ^[27]	$k = c_0 \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2 M_s^2}$	常用, 适用范围广, 有大量验证
Fair-Hatch ^[28]	$k = \frac{1}{\beta} \left[\frac{(1 - n)^2}{n^3} \left(\frac{\Phi}{100} \sum_m \frac{P_m}{d_m} \right)^2 \right]^{-1}$	松散多孔介质, 有验证
郁伯铭 ^[29]	$K = \frac{\mu L_0 Q}{\Delta P A} = \frac{\pi}{128} \frac{L_0}{A} \frac{d_f}{3 + d_T - d_f} \lambda_{\max}^{3 + d_T}$	适用范围较广, 有验证
Ergun 等 ^[30]	$\Delta P = a \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_g \nu_g}{d^2} + b \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g \nu_g^2}{d}$	适用广, 被广泛验证
Bear ^[32]	$k = \frac{nd^2}{32} (\text{孔隙}), \frac{nb^2}{12} (\text{裂隙})$	岩石, 有验证
施明恒 ^[33]	$K = Br_p \frac{2(d_s - d_a)}{d_a} \frac{1}{d^2} \frac{(D_{\max}^d - D_{\min}^{d+1})^2}{(d + 1)^2} \frac{[1 + (cX^{d_a - 2})]^{3/2}}{(1 - cX^{d_a - 2})^3}$	土壤及颗粒介质, 未见实验报道

表 3 非达西流流动分区

所在区域	Ifiyenia	Fand	Macdonald	Ergun	李振鹏等 ^[34]
Forchheimer 区 (Re_p)	[0.34—2.3]	[0.57, 9]	[0.03, 32.7]	[0.08, 196]	[0.95, 15]
湍流区 (Re_p)	≥ 3.4	≥ 13.5			≥ 15

表 4 Ergun 型方程常数 a, b 取值

作者	Forchheimer 区	湍流区
Ergun ^[30]	$a = 150, b = 1.75$	
王英波等 ^[31]	$a = 411\Phi_s - 145, b = 2.8\Phi_s + 0.00698$	
李振鹏等 ^[34]	$a = 160, b = 1.35$	$a = 193, b = 1.22$
Ifiyenia ^[35]	$a = 180, b = 9.4 (3 \leq Re_p \leq 20)$	$a = 342, b = 2.95 (Re_p \geq 30)$
Fand ^[36]	$a = 182, b = 1.92 (5 \leq Re_p \leq 80)$	$a = 225, b = 1.61 (Re_p \geq 120)$
Irmay ^[37]	$a = 180, b = 0.6$	
Macdonald ^[38]	$a = 180, b = 1.8$	

3 多孔介质内部对流换热研究现状

多孔介质内部传热过程大致可以分为两种情

况: 第一, 如果多孔介质内没有流动或者只有缓慢流动, 且流固之间温差较小, 或者流动较强时, 流固间几乎无温差, 这些情况下, 一般把多孔介质按整

体处理, 运用局域热平衡模型, 用等效热导率来描述其热传递的整体行为则可; 第二, 如果流动较强, 流固间有一定温差, 则需要运用局域非热平衡模型, 即多孔介质特征单元内部流体与固体间未达到热平衡, 主要考虑对流换热. 局域热平衡模型在土壤传热传质、建筑采暖、物料干燥、化工反应器、生物体内传热传质和航天器热管中均有着广泛应用, 具体可以参考刘伟等编著的《多孔介质传热传质理论与应用》一书. 近年来, 局域非热平衡模型的应用也在广泛开展, 比如高温散体冷却^[39-42]、强化传热^[43-45]、多孔介质燃烧技术^[46,47]、多孔介质内非热平衡化学反应^[48]、太阳能发电^[49]、和多孔泡沫金属传热传质^[50]等, 这些应用方面的详细总结将结合多孔介质数值模拟另撰文阐述, 这里主要对理论模型和实验研究, 尤其是主要对流换热系数关联式进行综述.

对流换热是多孔介质内部流动过程热传递的主要方式之一, 在强制流动情况下往往占据主导作用, 不过, 多孔介质内部对流换热过程影响因素众多, 包括惯性作用、界面效应、黏性耗散、浮升力、变物性、变孔隙率、颗粒形状和颗粒粒径等, 这给对流换热系数的确定带来很大的困难, 目前主要靠经验公式或者经过大量简化后得到的一些理论结果.

3.1 国内研究进展

清华大学姜培学等早期 (1999 年)^[51] 在研究火箭发动机冷却过程时用微小槽道中的局部对流换热系数处理多孔介质内部对流换热. 后来 (2006 年)^[52], 在研究微细多孔介质 (颗粒直径 0.2 mm 左右) 内部对流换热时提出局部体积平均法和集总参数法两种处理方法, 与实验结果符合较好. 最近^[53], 胥蕊娜和姜培学等在对流换热实验研究的基础上拟合了两个 Nu 数实验关联式 (见表 5 多孔介质主要对流换热系数关联式), 一个适用于粒径在 20 μm 以上颗粒堆积床, 一个适用于 20 μm 以下, 且考虑了尺度效应的修正, 主要考虑速度滑移和温度跳跃. 然而, 其作者认为此拟合关联式还需要更多的实验验证.

3.2 国外研究进展

由于多孔介质本身的复杂性, 最开始认为

多孔介质相间没有温度差别, 满足局域热平衡, Slattery (1981 年)^[54] 应用平均理论得到了局域体积平均能量微分方程 (单温度方程). 接着 Carbonell 和 Whitaker (1984 年)^[55] 根据量级分析, 得到了多孔介质局域热平衡假设成立的时间和长度标准, 后来 Zanotti 和 Carbonell (1984 年)^[56], Levec 和 Carbonell (1985 年)^[57], Quintard 和 Whitaker (1993 年)^[58], 及 Quintard (1997 年)^[59] 又在此基础上提出了局域非平衡假设并推导得到固体和流体相的双温度方程. 显然, 在双温度方程中流固之间的对流换热系数的确定显得非常重要, 到目前许多研究者通过大量实验得到了许多不同情况下的对流换热系数关联式, 理论研究得到的关联式较少, 常用关联式见表 5.

表 5 中 Whitaker 关联式是通过随机填充床和压实叉排管束的换热数据分析得到, 多年来一直有着广泛的应用, 对大多数设计计算都有满意的结果. 这种形式后来被 Kreith, Frank, Bohn 和 Mark (2001 年) 略加修改得到了另一关联式, 能够适于较大孔隙率范围和多种形状的填料. 另外, Wakao 和 Kaguei (1978 年) 类比传质关联式得到另一种应用较广的对流换热系数关联式, 雷诺数范围在 $15-10^5$ 之间, 后 Saito 又对此形式的系数进行了调整并引入了新参数 Φ , 就可以适应更高的雷诺数范围. 还有, Kuwahara 等曾经推导得出一个关于对流换热系数的理论解析式, 公式没有任何经验常数, 被试验验证适合于广泛的孔隙率、雷诺数和普朗特数, 但遗憾的是该解析式只适合于多孔介质层流流动. Pallares 和 Grau (2010 年) 又通过大量实验数据对 Kuwahara 公式进行了修正, 等于原公式乘以 2.

可见, 对流换热关联式主要通过实验和数值模拟方法得到, 不同情形关联式形式不一, 系数有别, 选用时需要注意. 理论解析解只在层流时被研究, 湍流理论关联式很难得到, 这仍是该领域研究的难点, 可能需要借助新的工具和研究方法. 另外可以看出, 小于 20 μm 的颗粒填充床需要考虑尺度效应, 即考虑速度滑移和温度跳跃.

4 热弥散机理

对弥散的研究开始^[68] 是从传质开始的, 认为多孔介质内部传质除了对流传质外还包括分子扩

散和机械扩散. 而机械扩散就是所谓的弥散, 是由三种情况引起: 1) 流体通过每个孔时速度分布不同; 2) 流体通过的孔隙尺寸变化导致速度变化; 3) 流体通道的迂曲. 而且可以猜测热弥散的机制也与

此相似. 由于弥散的机制非常复杂, 所以对弥散的研究涉及到许多层面、方法和模型, 这些模型概括起来可以分为几何模型、随机网络模型、统计几何模型和统计模型四类.

表 5 多孔介质主要对流换热系数关联式

作者	对流换热系数	适用范围
姜培学 胥蕊娜 2008 年	$Nu = (0.86 - 4.93\varepsilon + 7.08\varepsilon^2)Re_d^{1.15}Pr^{1/3}$	粒径 200—40 μm
	$Nu = \frac{0.86 - 4.93\varepsilon + 7.08\varepsilon^2}{1 + 48Kn}Re^{1.15/1+24Kn}Pr^{1/3}$	粒径 < 20 μm
Whitaker ^[60] 1972 年	$Nu = 2 + (aN_{Re^{1/2}} + bN_{Re^{2/3}})N_{Pr^{1/3}}\left(\frac{\mu_b}{\mu_0}\right)^{0.14}$	$Re > 50$
Zukauskas ^[61] 1972 年	$Nu = \frac{hd}{k_f} = 0.022Re_d^{0.84}Pr^{0.36}$	湍流
Wakao, Kaguei 1978 年 ^[62]	$\frac{hd}{k_f} = 2 + 1.1Pr^{1/3}\left(\frac{\rho_f \langle u \rangle d}{\mu_f}\right)^{0.6}$	$Re(15-10^5)$
Nagata K ^[63] 1998 年	$ha_p = 3.30 \times 10^3 F^{0.7} G^{0.68} \quad (G < G_{ld})$ $ha_p = 6.50 \times 10^3 F^{1.17} G^{2.27} \quad (G_{ld} < G < G_{fl})$	适于微细多孔介质, 逆流移动床
Kreith, Frank, Bohn, Mark ^[64] 2001 年	$\frac{hd}{k_f} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}(0.5Re_d^{1/2} + 0.2Re_d^{2/3})Pr^{1/3}$	$Re(20-10^4)$ $\varepsilon(0.34-0.78)$
Kuwahara ^[65] 2001 年	$\frac{hd}{k_f} = \left(1 + \frac{4(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\right) + \frac{1}{2}(1-\varepsilon)^{1/2}Re_d^{0.6}Pr^{1/3}$	层流 $\varepsilon(0.2-0.9)$
Saito ^[66] 2006 年	$\frac{hd}{k_f} = 0.08\left(\frac{Re_d}{\varepsilon}\right)^{0.8}Pr^{1/3}; 1.0 \times 10^4 < \frac{Re_d}{\varepsilon} < 2.0 \times 10^7$	湍流
Pallares ^[67] 2010 年	$\frac{hd}{k_f} = 2\left(1 + \frac{4(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\right) + (1-\varepsilon)^{1/2}Re_d^{0.6}Pr^{1/3}$	层流

4.1 热弥散的研究的必要性

热弥散在地下水热交换中的作用是否需要考虑似乎还存在一些争议^[69-78], 其他领域基本认为在多孔介质对流换热过程需要考虑热弥散的, 但如何精确计算需要进一步研究. Murthy(1997 年)^[79,80]研究了饱和多孔介质中的弥散效应及黏性耗散对非 Darcy 混合对流换热的影响, 指出热弥散效应会强化传热, 但随着弥散参数值的增加, 黏性耗散的影响也将增大, 而黏性耗散会削弱传热. 杜建华(2001 年)^[81]认为由于弥散效应引起动量和能量传递的增加, 使得热弥散效应成为多孔介质流动与传热研究的重要内容之一. Testu(2007 年)^[82]称多孔介质中的热弥散是流体、固体和对流之间的综合作用, 在能量方程简单的添加对流项不能合理考

虑水动力学效应, 必须加入弥散项.

4.2 热弥散系数的经验关联式

热弥散与传质弥散一样有着非常复杂的机理, 其理论研究非常困难, 目前还多采用实验经验公式, 下面列出一些主要研究结果. Yagi(1960 年)^[83]最早测量固定床的有效纵向热弥散系数. Bauer 等(1978 年)^[84]为了考虑横向热弥散, 对一个热输运模型进行了量纲分析得到了热弥散模型, 该模型非常广泛地用在化学工程领域, 是通过与串联全混反应器中的质量弥散类比推导得到的. Levec 和 Carbonell(1985 年)^[85]针对静止情况采用局域热平衡方法确定了横向热弥散系数, 该方法是基于双相模型. Koch 和 Brady(1985 年)^[86]提出轴向

和径向热弥散效应的理论性半经验关系式. Cheng 和 Hsu (1986 年)^[87] 借鉴湍流混合长度理论对填充管内受迫对流的热弥散和壁面效应进行了研究. Hunt 和 Tien (1988 年)^[88] 利用统计平均的方法和混合长度理论提出了远离壁面区和近壁区热弥散效应的表达式, 并根据他们自己的实验数据确定了其中的经验常数. Chou (1992 年)^[89] 推导得出了新的热弥散模型, 该模型具有较少的可调经验参数. 运用该模型预测的 Nu 数与 Re 数的关系与试验结果一致. 姜培学等 (1996 年)^[90] 根据他人和自己的实验数据与数值模拟结果的对比, 提出了热弥散效应的修正式. Nakayama (1996 年^[91], 1999 年^[92]) 试图通过对特定几何形状的多孔结构内流动和传热的直接模拟, 来研究多孔介质内的弥散效应和湍流模型. Metzger 等 (2004 年)^[93] 估计了水流过玻璃球堆积床的纵横向热弥散系数, 但由于灵敏度的原因没有足够高的精度. Testu (2007 年)^[82] 利用反向策略, 设计实验装置测试了纵向和横向热弥散, 理论分析得到了热弥散经验关联式, 适用于颗粒雷诺数 12—130. 杜建华等^[81] 把多孔介质里的单向流动看流动脉动, 推导得出了多孔介质里流动的热弥散系数. Kuwahara 等^[91,94] 对于周期结构的多孔介质, 数值模拟得到了热弥散系数. 所以, 由上述对热弥散系数的经验关联式研究可以看出: 对热弥散关联式的获取方法多样, 有的通过质量弥散类比进行研究, 有的采用混合长度理论进行推导, 还有的采用动量分析和反问题方法, 当然主要还是

采用理论分析和实验相结合进行研究; 另外, 热弥散系数关联式因不同领域、不同对象、不同雷诺数范围而异.

5 对辐射换热研究

辐射换热需不需要考虑, 需要什么时候和怎样考虑目前还没有完全统一的说法. 1996 年, ADUDA^[95] 比较了三种典型等效热导率公式, 认为多孔介质在温度大于 573 K 时需要考虑辐射换热. 张海林 (2004 年)^[96]、张省现 (2005 年)^[14] 和陈勇 (2007 年)^[15] 在分别研究高温散体多孔介质和隔热材料的有效导热系数时考虑了辐射换热, 实际上是根据 ADUDA 的研究结果. 不过, 司俊龙 (2008 年)^[39] 在对烧结过程热传递研究时认为辐射换热只是在固体颗粒之间温差较大、空隙为真空或由气体占据时才比较明显. 很显然, 从理论的角度考虑, 当多孔介质内部如果温度本身很低而且温差很小时, 辐射换热很小是可以忽略的, 但是如果对高温散体多孔介质又会怎样呢, 下面做一个简化估算来得到一些规律和结论.

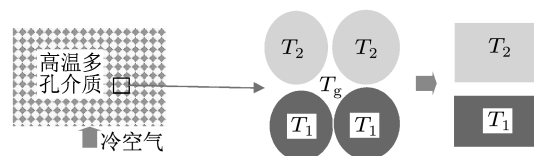


图 1 高温多孔介质对流和辐射换热简化模型

表 6 高温多孔介质辐射热流和对流换热热流对比

高温颗粒 温度 T_1/K	低温颗粒 温度 T_2/K	气体温度 T_g/K	对流换热热量 $/W \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	辐射换热热量 $/W \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	辐射热量比 对流热量 / %
1000	999	995	1350	151.0	11.2
1000	999	998	450	151.0	33.5
1000	999	999	150	181.2	120.8
900	899	898	450	132.0	29.3
500	499	499	150	18.8	12.6
471	470	470	150	15.7	10.5
464	463	463	150	15.1	10.0

如图 1, 对高温多孔介质被冷却空气由下部吹入冷却的情况 (具体应用如烧结矿、水泥熟料、干熄焦的冷却等), 选取高温多孔介质的一个特征单元, 孔和四周的颗粒, 多孔介质具有这样的周期结

构. 通过简化认为它近似于两块离得很近的大平板, 颗粒表面灰度 Gr 取 0.8, 气体强制对流绕过颗粒, 取多孔介质对流强化系数 1.5, T_1 表示高温颗粒部分, T_2 表示低温颗粒部分, T_g 表示中间气体, 那么

可以根据无限大平板间辐射模型计算辐射换热热流 ($q_{\text{Wr}} = 5.67 \times 10^{-8} \times (T_1^4 - T_2^4) / (2/Gr - 1)$), 对流热流根据牛顿冷却定律计算 ($q_{\text{WC}} = 1.5 h(T_1 T_2)$), 对流换热系数取空气强制对流换热系数的上限 100^[86], 考虑多孔介质强化传热效果再乘以 1.5 的强化系数, 乘以换热面积可以得到辐射换热热量和对流换热热量的比值, 如表 6.

由表 6 中可见, 固体表面温差不变, 随着气固间温差的增大, 对流换热越强烈, 辐射换热热量占对流换热热量的百分比越小, 1000 K 时, 固体表面温差为 1 K, 气固间温差为 5 K 时辐射换热热量占对流换热热量的 13.4% 以上, 如果气固间温差和辐射固体表面间温差均相差 1 K 时, 辐射换热热流甚至强于对流换热热流; 在 470 K 时温差虽均为 1 K, 但辐射换热热量占对流换热热量的 10.5%, 此时, 如固体温度降到 463 K 及以下时, 比例下降到 10% 以下.

所以从初步估算可知, 对气体和固体间以及固体表面间的温差为 1 K 时, 高温多孔介质在 464 K 以上时需要同时考虑对流换热和辐射换热, 所以对高温多孔介质冷却过程而言, 上部和中上部区域可能满足此条件, 需要考虑辐射换热; 如果固体表面间温差不变, 随着气固间温差的增加对流换热越来越强, 高温多孔介质也可能用不着考虑辐射换热, 这取决于辐射换热热量与对流换热热量之比.

6 总结

1) 多孔介质渗流理论模型经历了达西模型及许多研究者的修正, 考虑惯性力、黏性阻力、有效黏度、加速度和惯性效应, 最后发展为 Darcy-Brinkman-Forchhemier 模型. 不过可以看出, 这样的模型距建立系统完善的多孔介质理论似乎还有很长的路要走, 因此多孔介质渗流发展最活跃的还是简单实用的经验关联式. 比较有名的如 Darcy, Forchhemier, Bear, Kozeny-Carman 和 Ergun 关联式等, 而且随着 20 世纪 70 年代后分形理论的发展,

研究者开始尝试应用分形理论求解多孔介质渗流解析关联式. 其中, 华中科技大学郁伯铭教授的分形解析关联式不含任何经验常数, 且被实验验证, 显示出了分形理论在处理复杂随机问题的优越性. 当然, 在这些渗流关联式中, 应用最广的还是 Ergun 方程, 多年来被许多实验和工程应用反复验证过, 不过 Ergun 方程确实也存在一些不足, 其系数在许多情况下是不确定的.

2) 多孔介质传热问题可以大致分为两类来考虑. 一类是内部无流动或者非常缓慢, 或者流固之间温差很小时的传热, 这一类传热可以按导热来处理, 采用局域热平衡模型, 用等效热导率作为宏观导热系数, 有各种情况的关联式可以利用. 另一类是内部发生强制对流而且流固间存在一定的温差, 该类传热需要采用局域非热平衡模型, 核心是获取正确的对流换热系数. 目前, 对流换热关联式主要通过实验和数值模拟方法得到, 湍流理论关联式仍是该领域研究的难点, 可能需要借助新的工具和研究方法. 另外, 小于 20 μm 的颗粒填充床需要考虑尺度效应, 即考虑速度滑移和温度跳跃.

3) 对热弥散目前已经开发出许多理论模型, 但由于其本质的复杂性还得广泛借助实验研究, 大量经验关联式的研究就是明显的例证. 不过可以看出, 热弥散经验关联式因不同领域、不同对象、不同雷诺数范围而异. 对热辐射的考虑目前还未有统一说法, 有的研究者统一纳入等效热导率中, 有的却未作考虑, 有的认为不必要考虑. 根据估算可以得到, 对气体和固体间以及固体表面间的温差约为 1 K 时, 多孔介质在 464 K 以上时需要同时考虑对流换热和辐射换热, 所以对高温多孔介质冷却过程而言, 上部和中上部区域可能满足此条件, 需要考虑辐射换热. 如果固体表面间温差不变, 随着气固间温差增加对流换热越来越强, 高温多孔介质也可能用不着考虑辐射换热, 这取决于辐射换热热量与对流换热热量之比, 当然更准确的结论还需要更为深入的研究.

附录

表 7 文中术语表及单位

符号	物理量	单位
k	渗透率	m^2
M_s	颗粒的比表面积	m^{-1}
c_0	经验常数	Carman 建议一般取 1/5
a, b, c	实验确定的经验常数	
J	水力坡度	
v	渗流速度	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
q	渗流的速度	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
K	渗流系数	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
A	过水的断面面积	m^2
P	压强	Pa
Q	流量	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Z	位置高度	m
γ	液体容重	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$
ρ_w	水的密度	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ε	熟料床层孔隙率	
ρ_g	气体密度	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_f	流体密度	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
v_g	气体的速度	$\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$
d_p	熟料平均粒径	m
H	网格单元高度	m
ΔP	压降	Pa
μ_g	气体动力黏度	Pa·s
μ_f	液体的动力黏性系数	Pa·s
d_f	面积分形维数	
d_T	弯曲度维数	
$\lambda_{\max}$	最大孔隙直径	m
ε	孔隙率	
d_a	孔隙分形维数	
d_p	颗粒分形维数	
d_s	谱维数	
$D_{\max}$	土壤中最大颗粒直径	m
$D_{\min}$	土壤中最小颗粒直径	m
β	松散多孔介质的密度因子, 由实验确定为 5	
Φ	砂粒形状系数, 球形颗粒取 6, 有棱角颗粒取 7.7	
P_m	保留在相邻网筛的砂粒百分比	
d_m	相邻筛孔的几何平均值	m
Nu	努谢尔准数	
Re	雷诺数	
Pr	普朗特数	
h	对流换热系数	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
d	颗粒直径	m
u	流体流速	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
k_f	流体导热率	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

- [1] Lage J L, Antohe B V, Nield D A 1997 *J. Fluids Eng.* **119** 701
- [2] Liu W, Fan A W, Huang X M 2006 *Theory and Application of Heat and Mass Transfer on Porous Media* (Beijing: Science Press) p31 (in Chinese) [刘伟, 范爱武, 黄晓明 2006 多孔介质传热传质理论与应用 (北京: 科学出版社) 等 31 页]
- [3] Somerton C W 1989 *J. Heat Transf.* **111** 357
- [4] Poulidakos D 1987 *ASME J. Heat Transf.* **109** 653
- [5] Nishimura T, Takumi T 1986 *Int. J. Heat Mass Transf.* **29** 889
- [6] Vafai K, Tien C L 1981 *Int. J. Heat Transf.* **24** 195
- [7] Alkam M K, Al-Nimr M A 1998 *Int. J. Heat Mass Transf.* **41** 347
- [8] Xu Y S 2003 *Acta Phys. Sin.* **53** 626 (in Chinese) [许友生 2003 物理学报 **53** 626]
- [9] Xu Y S, Li H B, Fang H P, Huang G X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 773 (in Chinese) [许友生, 李华兵, 方海平, 黄国翔 2004 物理学报 **53** 773]
- [10] Xu Y S, Wu F M, Chen Y Y, Xu X Z 2003 *Chin. Phys.* **12** 621
- [11] Xu Y S, Xu X Z 2002 *Chin. Phys.* **11** 583
- [12] Dong P, Feng S D, Zhao Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 434
- [13] Wu B Z, Xu Y S, Liu Y, Huang G X 2005 *Chin. Phys.* **14** 2046
- [14] Zhang S X 2005 *M. S. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [张省现 2005 硕士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [15] Cheng Y 2007 *M. S. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [陈勇 2007 硕士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [16] Xia D H, Guo S S, Ren L 2010 *J. Therm. Sci.* **19** 1
- [17] Guo S S 2007 *M. S. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [郭珊珊 2007 硕士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [18] Yuan M J, Yu B M, Zheng W, Yuan J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024703-1 (in Chinese) [员美娟, 郁伯铭, 郑伟, 袁洁 2011 物理学报 **60** 024703-1]
- [19] Wang S F, Yu B M 2011 *Int. J. Multiphase Flow* **37** 507
- [20] Wang S F, Yu B M 2011 *Transport Porous Media* **87** 191
- [21] Li J H, Yu B M 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034701
- [22] Cai J C, Yu B M 2010 *Fractals* **18** 417
- [23] Yun M J, Yu B M, Lu J D, Zheng W 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104704
- [24] Yu B M, L J H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1569
- [25] Yu B M, Liu W 2004 *AIChE J.* **50** 46
- [26] Forchheimer P 1901 *Z. Ver. Deutsch. Ing1* **45** 1782
- [27] Carman P C 1937 *Trans. Inst. Chem. Eng.* **15** 150
- [28] Fair G, Hatch L 1933 *J. AWWA* **25** 1551
- [29] Yu B M, Tames L, Cao H Q 2002 *Polymers Composites* **110** 378
- [30] Ergun S 1952 *Chem. Eng. Prog.* **48** 89
- [31] Wang Y B, Liu H F, Feng Y F 2003 *Fuel Chem. Proc.* **34** 236 (in Chinese) [王英波, 刘华飞, 冯妍卉 2003 燃料与化工 **34** 236]
- [32] Bear J 1972 *Dynamics of Fluids in Porous Media* (New York: Elsevier) (in Chinese) [贝尔 1983 多孔介质流体动力学 (北京: 中国建筑工业出版社)]
- [33] Shi M H, Cheng Y P 2001 *Sci. Chin Ser. E* **44** 625
- [34] Li Z P, Sun Z L, Liao Y H 2009 *Appl. Sci. Technol.* **36** 61 (in Chinese) [李振鹏, 孙中宁, 廖永浩 2009 应用科学 **36** 61]
- [35] Kececioglu I 1994 *J. Fluids Eng.* **116** 164
- [36] Fand R M, Kim B Y K, Lam A C C, Phan R T 1987 *J. Fluids Eng.* **109** 268
- [37] Lrmay S 1965 *Transf. Water Porous Media* **29** 36
- [38] Macdonald F, Ei-sayed M S, Mow K Dullien F A L 1979 *Industrial Engineering Chemistry* **18** 199
- [39] Si J L 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [司俊龙 2009 博士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [40] Liu H F 2002 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [刘华飞 2002 博士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [41] Long H M, Fan X H, Mao X M 2008 *J. Centr. South Univ. (Science and Technology)* **39** 436 (in Chinese) [龙红明, 范晓慧, 毛晓明 2008 中南大学学报 (自然科学版) **39** 436]
- [42] Jin Z, Wen Z, Si J L 2008 *Metallurg. Ind. Autom.* **32** 5 (in Chinese) [金周, 温治, 司俊龙 2008 冶金自动化 **32** 5]
- [43] Ming T Z, Zhou C, Liu W 2011 *J. Wuhan Univ. Technol.* **33** 62 (in Chinese) [明廷臻, 周程, 刘伟 2011 武汉理工大学学报 **33** 62]
- [44] Yu M, Jiang P X 2007 *J. Eng. Therm. Phys.* **28** 286 (in Chinese) [于淼, 姜培学 2007 工程热物理学报 **28** 286]
- [45] Yang J, Zeng M, Yan X, Wang Q W 2009 *Nucl. Power Eng.* **30** 16 (in Chinese) [杨剑, 曾敏, 闫晓, 王秋旺 2009 核动力工程 **30** 16]
- [46] Rao W T 2011 *World Steel Iron* **1** 22 (in Chinese) [饶文涛 2011 世界钢铁 **1** 22]
- [47] Wang G Q, Cheng L M, Xu J R, Luo Z Y, Cen K F 2009 *Pro. Chin. Soc. Electr. Eng.* **29** 26 (in Chinese) [王关晴, 程乐鸣, 徐江荣, 骆仲决, 岑可法 2009 中国电机工程学报 **29** 26]
- [48] Li M C, Tian Y W, Zhai Y C 2006 *J. Chem. Ind. Eng.* **57** 1079 (in Chinese) [李明春, 田彦文, 翟玉春 2006 化工学报 **57** 1079]
- [49] Xu C, Liu D Y, Zheng Y, Lv J H 2010 *Proceedings of the Chin. Soc. Electr. Eng.* **30** 122 (in Chinese) [许昌, 刘德有, 郑源, 吕剑虹 2010 中国电机工程学报 **30** 122]
- [50] Zhang D, Li J X 2010 *Mater. Rev.* **24** 256 (in Chinese) [张丹, 李菊香 2010 材料导报 **24** 256]
- [51] Jiang P X, Ren Z P, Zhang Z C 1999 *J. Propul. Technol.* **20** 1 (in Chinese) [姜培学, 任泽霏, 张左 1999 推进技术 **20** 1]
- [52] Xu R N, Jiang P X, Gong W 2006 *J. Eng. Thermophys.* **27** 823 (in Chinese) [胥蕊娜, 姜培学 2006 工程热物理学报 **27** 823]
- [53] Xu R N, Jiang P X 2008 *J. Eng. Thermophys.* **29** 1377 (in Chinese) [胥蕊娜, 姜培学 2008 工程热物理学报 **29** 1377]
- [54] Slattery J C 1981 *Momentum, Energy, and Mass Transfer in Continua* (2nd Ed.) (Florida: Krieger Publishing Company)
- [55] Carbonell R G, Whitaker S 1984 *Heat and Mass Transfer in Porous Media, in Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media* (Massachusetts: Martinus Nijhoff Publishers) p121
- [56] Zanolotti F, Carbonell R G 1984 *Chem. Eng. Sci.* **39** 263
- [57] Levee J, Carbonell R G 1985 *AIChE J.* **31** 581
- [58] Quintard M, Whitaker S 1993 *Chem. Eng. Sci.* **48** 2537
- [59] Quintard M, Kaviany M, Whitaker S 1997 *Adv. Water. Resour.* **20** 77
- [60] Whitaker S 1972 *AIChE J.* **18** 361
- [61] Zukauskas A 1972 *Adv. Heat Transfer* **18** 93
- [62] Wakao N, Kaguei S, Funazkri T 1979 *Chem. Eng. Sci.* **34** 325
- [63] Nagata K, Ohara H, Nakagome Y 1998 *Powder Technol.* **99** 302
- [64] Frank K, Bohn, Mark S 2001 *Principles of Heat Transfer* (6th Ed.) (Connecticut: Thomson Learning) 442
- [65] Kuwahara F, Sirota M S 1999 *Japan Soc. Mech. Eng.* **66** 665

- [66] Saito M B, De Lemos M J S 2005 *Latin Am. J. Solids Struct.* **2** 291
- [67] Pallares J, Grau F X 2010 *Int. Communi. Heat Mass Transf.* **37** 1187
- [68] Yi Z 1999 *Ph. D. Dissertation* (West Lafayette: Purdue University)
- [69] Uffink G J M 1983 *J. Hydrol.* **60** 311
- [70] Woodbury A D, Smith L 1985 *J. Geophys. Res. Solid Earth Planets* **90** 759
- [71] Bear J, Corapcioglu M Y 1981 *Water Resour. Res.* **17** 723
- [72] Willemsen A, Groeneveld G 1989 *Ground Water Contamination: Use of Models in Decision-Making* (Dordrecht: Kluwer Academic Publisher) 337
- [73] Gehlin S E A, Hellstrom G, Nordell B 2003 *Renew Energy* **28** 2239
- [74] Diao N R, Li Q Y, Fang Z H 2004 *Int. J. Therm. Sci.* **43** 1203
- [75] Fan R, Jiang Y, Yao Y, Shiming D, Ma Z 2007 *Energy* **32** 2199
- [76] Anderson M P 2005 *Ground Water* **43** 951
- [77] Ferguson G, Woodbury A D 2005 *Can. Geotech. J.* **42** 1290
- [78] Juan J H, Jesús C, Marco D 2009 *Adv. Water Resour.* **4** 1
- [79] Murthy P V S N, Singh P 1997 *Int. J. Heat Mass Transf.* **40** 1251
- [80] Murthy P V S N 1998 *Heat Mass Transf.* **33** 295
- [81] Du J H, Hu X J, Wu W, Wang B X 2001 *Chin. J. Mech. Eng.* **37** 9 (in Chinese) [杜建华, 胡雪蛟, 吴伟, 王补宣 2001 机械工程学报 **37** 9]
- [82] Testu A, Didierjean S, Mailliet D 2007 *Int. J. Heat Mass Transf.* **50** 469
- [83] Yagi S, Kunii D, Wakao N 1960 *AIChE J.* **6** 543
- [84] Bauer R, Schlünder E U 1978 *Int. Chem. Eng.* **18** 181
- [85] Levec J, Carbonell R G 1985 *AIChE J.* **31** 581
- [86] Koch D L, Brady F J 1985 *J. Fluid Mech.* **154** 339
- [87] Cheng P, Hsu C T 1986 *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **13** 613
- [88] Hunt M L, Tien C L 1988 *Int. J. Heat Mass Transf.* **31** 301
- [89] Chou F C, Su J H, Lien S S 1992 *Fundamental of Heat Transfer in Porous Media* (San Diego: American Society of Mechanical) **193** 57
- [90] Jiang P X, Wang B X, Ren Z P 1996 *Numerical Heat Transf A* **18** 305
- [91] Kuwahara F, Nakayama A, Koyama H A 1996 *J. Heat Transf.* **118** 689
- [92] Nakayama A, Kuwahara F 1999 *J. Fluids Eng.* **121** 427
- [93] Metzger T, Didierjean S, Mailliet D 2004 *Int. J. Heat Mass Transf.* **47** 3341
- [94] Kuwahata F, Nakayama A 1999 *J. Heat Transf.* **121** 160
- [95] Aduda B O 1996 *J. Mater. Sci.* **31** 6441
- [96] Zhang H L, Yang S Z 2004 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: North China Electric Power University) (in Chinese) [张海林 2004 博士学位论文 (北京: 华北电力大学)]
- [97] Yang S M, Tao W Q 2006 *Heat Transf.* (4th Ed.) (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [杨世铭, 陶文铨 2006 传热学 (第四版) (北京: 高等教育出版社)]

Review on forced convection heat transfer in porous media

Zheng Kun-Can^{1)2)†} Wen Zhi¹⁾ Wang Zhan-Sheng³⁾ Lou Guo-Feng¹⁾
Liu Xun-Liang¹⁾ Wu Wen-Fei²⁾

1) (School of Mechanic Engineering, University of Scitech of Beijing, Beijing 100083, China)

2) (School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

3) (Baotou Beifang Chuangye co., ltd, Baotou 014010, China)

(Received 26 April 2010; revised manuscript received 16 August 2011)

Abstract

Forced convection heat transfer in porous medium is involved mainly with the seepage, convection heat transfer, thermal dispersion and thermal radiation. Their research statuses and development trends are reviewed in this paper. The primary theoretical models, experimental research and empirical correlations were systemized and their features, application range and limitation were summarized too. Furthermore, the future research area and the difficulty are presented on the convection heat transfer of porous medium according to the comparative analysis of the past research results. In addition, when the radiation heat transfer can be considered in the cooling process of high temperature porous medium is determined by the simplifying calculation. All of these will be helpful to the theoretic research and engineering application of the porous medium.

Keywords: porous media, convection heat transfer, seepage flow, thermal dispersion

PACS: 44.27.+g, 44.30.+v, 44.35.+c, 44.40.+a

† E-mail: zhengkunchan@yahoo.com.cn