

Application and Research Progress of Porous Metal Materials in the Field of Heat Transfer Enhancement

Yong-jin Li¹, Ying-jie Ding¹, Xiao-cui Liu¹

¹School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, China
Email: yongjinli@sina.com, dyj19850830@163.com, supersea5991@yahoo.com.cn

Abstract: This paper introduced the situation of researching the heat transfer performance of porous metal materials with different structures, analyzed and sum up the features of heat transfer enhancement performance of different kinds of porous metal materials. Gasar porous metal is a kind of functional materials with special structure, which has a good all-round performance on mechanics, heat transfer and filtration, what's more the simple fabrication and the low cost provide, it has a widely prospect of industrial application in the field of heat transfer enhancement.

Keywords: Heat transfer enhancement; Porous metal material; Gasar porous metal

多孔金属材料在强化传热领域的应用与研究进展

李勇进¹, 丁英杰¹, 刘小翠¹

¹大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连, 中国, 116028
Email: yongjinli@sina.com, dyj19850830@163.com, supersea5991@yahoo.com.cn

摘要: 对不同结构多孔金属材料传热性能的研究现状作了介绍, 分析总结了不同多孔金属材料的强化传热性能。Gasar多孔金属是力学、传热与过滤综合性能俱佳的特殊结构功能材料, 且制备简单、价格低廉, 在强化传热领域中拥有广阔的工业应用前景。

关键词: 强化传热; 多孔金属材料; Gasar多孔金属

1 引言

由于工业及经济的迅速发展, 世界各国普遍面临着能源短缺问题, 因此, 利用强化传热技术高效廉价提高传热效率成为广受关注的课题。近几年来出现了很多强化传热的新方法^[1], 但最有前景的技术手段是应用新型强化传热材料特别是多孔金属材料。

由于孔隙的存在及孔隙与环境的交互作用, 多孔金属材料是一种非常特殊的功能材料。从结构上看, 金属内部弥散分布着大量的有方向性的或随机的孔洞。根据设计要求不同, 孔洞可以制成泡沫状、藕状或蜂窝状等等。这种孔隙结构决定了传热材料逐渐受到密切关注。

2 开孔类多孔金属材料传热性能研究现状

开孔类多孔金属材料包括无序的开孔金属泡沫和有序的点阵材料, 如类桁架材料、金属丝网筛结构、
国家科技型中小企业创新基金(07C26212121175)。

多孔金属材料具有质量轻、强度大、刚度大、韧性强、吸振吸音性能好和电磁屏蔽性能高等特点。同时, 由于多孔材料大量的孔洞中充满低导热系数的空气介质, 因此闭孔类多孔材料具有优良的隔热性能。与此相对应, 具有贯通孔隙的开孔类多孔材料在自然对流和强制对流条件下则可显著提高传热能力。

正因为多孔金属材料具有优良的力学性能和热物理性能, 所以近年来除了被广泛应用于航空航天、交通运输、建筑工程、机械工程、电化学工程、环境保护工程领域外, 作为性能优异的强化

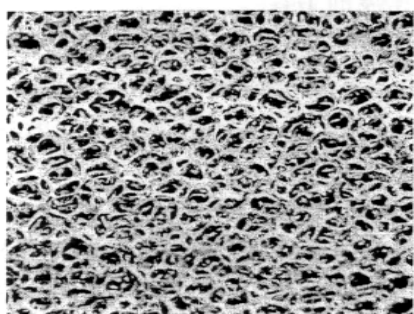
金属蜂窝材料和Gasar多孔金属材料等。通常, 评价某种结构的传热性能需要考虑两个变量: 传热系数和流体压降^[2]。其中, 传热系数包括导热系数、对流换热系数和辐射换热系数。而辐射换热一般远小于对流换热, 因此对辐射换热研究较少。多孔金属材料本身就是优良的传热介质, 首先, 因为其金属骨架本身具有

高导热系数；其次，孔隙结构具有较好的通透性和很高的比表面积；第三，当以开孔类多孔金属作为基体，在其孔隙结构中辅以强制对流相，则可最大限度发挥其材料和结构优势，显著增强强制对流换热效果。

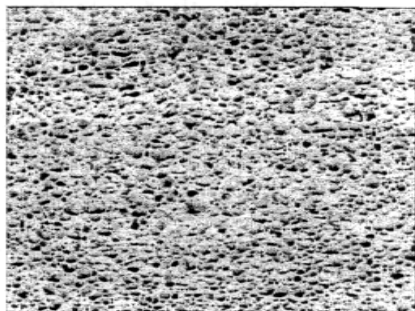
下面介绍以上几种典型开孔类多孔金属材料传热性能的研究现状。

2.1 泡沫金属材料

泡沫金属材料孔隙结构如图 1 所示。在未被堵塞条件下，它的透气性很高，几乎都是连通孔，孔隙表面积大，材料容重很小。



(a)



(b)

Figure 1. Foam metal material (a)Open-celled foam (b)Close-celled foam

图 1. 泡沫金属材料 (a) 开孔泡沫 (b) 闭孔泡沫

目前，其研究领域主要集中在常温导热和单相对流换热上。具有代表性的研究成果有：

- Kim 等人对铝泡沫金属中的空气冷却效果与传统的翅片式换热器进行了对比。结果发现铝泡沫的换热效果明显优于后者^[3]；
- 赵长颖等人对金属泡沫套管式换热器进行了理论分析，得出了影响换热性能的无量纲参数。结果表明金属泡沫换热性能明显优于传统翅片换热器^[4]；
- 李盈海等人对金属泡沫管内强制对流换热进行

了数值模拟。结果表明：当流体和固体导热系数比大于 0.001 时，采用低孔密度的金属泡沫既可以强化换热，同时也可以减小压降^[5]；

- 李菊香和涂善东在恒定热流密度条件下，分别强制单相流体轴向层流流经多孔泡沫金属换热器的管内和管外，对两种情况下的流动和传热的均匀性进行了分析。结果表明：填充多孔泡沫金属后，流体的分布和温度分布的均匀性明显比光管时提高，多孔泡沫金属对传热起到了明显的加强作用^[6]。
- 罗立峰和何永顺在专利中提出了一种新型多孔泡沫金属换热器，其特征是采用了具有螺旋环绕层结构的多孔泡沫金属作为换热带，大大提高了换热器的换热效率，还降低了它的制造成本，提高了生产效率^[7]。

这些研究均表明，金属泡沫材料具有良好的传热特性，但因泡沫材料本身的无序孔隙结构，导致流体压降高，而且在使用过程中孔隙易产生堵塞，不可避免地会导致其流体通过性和材料传热能力大大下降。

2.2 类桁架材料

类桁架材料结构如图2所示，它是近年出现的新型结构材料，对其流动传热规律的研究较少。Kim等人对单层桁架点阵夹层结构中的强制对流进行了实验、理论和数值研究。研究表明，压力降与结构的方向有很大关系：在不同方向下，换热性能相当，而压力降则相差30%-60%。类桁架杆与夹心板接触点的位置和倾斜角度均对局部传热特性有较大影响。同时发现，与不含夹芯层的平板对流传热性能相比，在相同孔隙下，引入点阵结构芯层使整体传热性能提高6倍^[8]。目前制备类桁架点阵材料的工艺还处于发展之中，可制备的材料还主要局限于试验室研究。

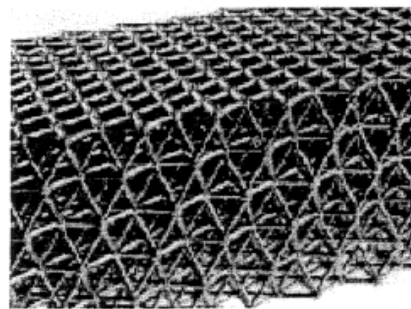


Figure 2. Truss-like material
图 2. 类桁架点阵结构

2.3 金属丝网筛

金属丝网筛结构如图3所示。对金属丝网筛结构传热的研究较早，然而在以往的研究中，网筛之间的交接点没有焊接，这使得它不可能作为结构件进行承载使用。另外，较大的接触热阻也使得它的传热能力有限。最近，采用现代焊接技术将所有节点完全焊接，可以实现承载和散热双重功能。Tian J对金属丝网筛换热结构总的流体压降及传热特性进行了实验研究。研究表明，这种结构中的流动与传热特性均为各向异性。金属丝网筛结构的摩擦因子是孔隙率的函数，与流动方向的开口面积比有关，而流动方向的开口面积比与孔隙率和单胞拓扑两者均有关。传热量与孔隙率、固体相导热系数和面密度有关。对给定的一个雷诺数(Reynolds数)，存在一个最优的孔隙率，可使整体的换热性能最高。例如，铜质网筛结构的换热效率约是铜质开孔金属泡沫换热效率的3倍^[9-10]。

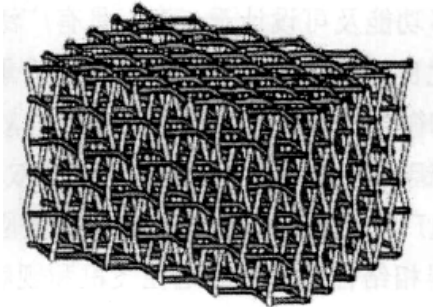


Figure 3. Woven metallic structures (textile)

图 3. 金属丝网筛结构

2.4 金属蜂窝材料

金属蜂窝材料的结构特点是小壁厚、高开口度、小密度、均匀孔径和高比表面积等，其结构如图4所示。不同于上述几种多孔金属材料中的湍流流动传热，在蜂窝材料中即使有较高的流速通过仍能维持层流，而且流动压降比较小^[11]。同时，蜂窝材料中的高比表面积弥补了层流对流换热的低传热系数。因此，蜂窝材料在压降和传热系数两方面均有良好表现。卢天健等针对均匀的正六边形蜂窝材料，以离散性的褶皱模型展开了针对电子元器件散热效率的研究。结果表明，与两平板间的传热相比，蜂窝材料传热效率提高两个数量级，与金属泡沫的传热效率相当^[12]。Kim等人研究了蜂窝形二维夹芯材料的强制对流换热特性与效

率，计算表明该材料较泡沫金属材料的传热效率更高^[13]。

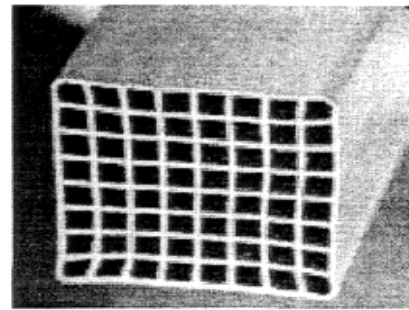


Figure 4. Honeycomb material

图 4. 蜂窝材料

由于目前金属蜂窝材料制备工艺的核心技术、成形机理、蜂窝分布特征（形状、类型、孔径、孔隙率和均匀性等）与力学性能的关系等相关理论研究滞后，其应用受到限制。就制备工艺来看，金属蜂窝材料制备工艺复杂，工序多及性能难以保证（要求比表面积大、耐高温、耐腐蚀、力学性能高和气阻小等综合性能），导致其价格居高不下，也是其应用受到限制的原因之一。同时，在制造及使用过程中易产生脱胶和剥离等缺陷，造成大量的能源、材料、人力和物力的浪费^[14]。

2.5 Gasar多孔金属材料

金属/气体共晶定向凝固（Gasar）^[15]是一种制备藕状多孔金属和放射状多孔金属的技术。Gasar多孔金属材料的典型结构如图5所示。金属或合金在高压环境下熔化，然后通过定向凝固工艺直接制备出多孔金属材料，是一种短流程、高效率 and 节能的制备新工艺。采用Gasar工艺所得到的定向规则多孔结构(包括气孔排列、尺寸和分布等)被称之为Gasarite结构，是目前任何其它加工方法所不能得到的，而且孔隙率、孔径可随意调节。

Gasar多孔材料除具有传统多孔金属的性能特点外，还具有自己特殊的力学性能和热学性能优势。该材料沿气孔方向力学性能优异，没有明显的应力集中，具有比相同材质的整块致密金属更高的综合力学性能：密度低、比模量高和比强度高。一般来说，烧结型多孔材料的导热能力总比相应的致密材料的导热能力低，而且随着气孔率的升高，其导热能力下降很快，

有点类似于其强度随气孔率的下降趋势。而具有 Gasarite 结构的多孔材料则不同, 它很显著地提高了材料的导热系数。比如对于 Gasar 铜来说, 它的导热系数是传统多孔铜材的 1.4 倍。提高的主要原因是可以通过调整 Gasar 工艺参数使气孔的指向、大小和形状向着提高材料导热能力的方向发展。与平表面比较起来, 具有气孔的 Gasar 表面可以使材料的冷却速率提高 20-50 倍, 辐射换热能力提高达 5 倍左右^[16-17]。

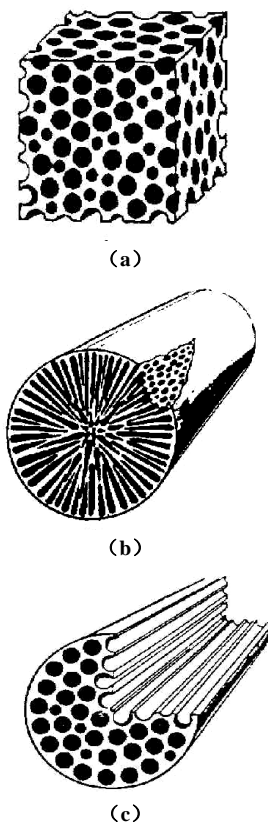


Figure 1. Gasar porous material (a)Arbitrary intersecting (b)Radial (c) Arbitrary through

图 5. Gasar 多孔材料 (a) 任意交错 (b) 放射状 (c) 任意贯穿

如前所述, 传热系数和流体压降是评价某种结构传热性能的最重要指标。一方面, Gasarite 结构的传热系数通过调整制备工艺参数可以显著提高; 另一方面, Gasar 材料孔隙是长直光滑的通孔, 因此流过 Gasar 多孔结构的流体压降很低, 不易堵塞。显然, 与传统多孔金属材料相比, Gasar 多孔材料传热性能最佳, 更适于强化传热。

Gasar 多孔金属材料除具有优异的结构、力学和热学性能优势外, 其制备工艺简单成熟, 成本只比普通铸造高 10% 左右; 不易堵塞, 使用寿命长; 制备工艺

灵活, 可随意调控孔的大小、数目和孔隙率^[15]。因此, 具有结构、功能和成本等多方面综合优势的 Gasarite 结构金属材料拥有广阔的发展空间。

3 结语

应用多孔金属材料是提高强化传热效果、实现节能降耗的关键和捷径。泡沫多孔金属传热性能好, 但易堵塞, 寿命与可靠性受限制; 类桁架多孔金属材料、金属丝网筛结构传热机理研究滞后, 制备技术不成熟, 后者力学性能一般; 金属蜂窝材料和 Gasar 多孔金属材料力学和传热性能优异, 但与后者相比, 前者制备成本高昂。

显然, Gasar 多孔金属材料在性能、制造和使用成本等各方面具有优异的综合性能, 其在强化传热领域的进一步开发和推广应用具有重要实际意义和经济价值。

4 致谢

本论文研究内容获得了 2007 年国家科技型中小企业创新基金的资助, 项目编号为 07C26212121175。在此表示感谢。

References (参考文献)

- [1] Bing Han, Zhiping Xu. New technologies and advances in heat transfer enhancement[J]. *Energy Research and Information*, 2008, 24 (4): 233-236.
韩冰, 徐之平. 强化换热的方法及新进展[J]. *能源研究与信息*, 2008, 24(4): 233-236.
- [2] Tianjian Lu, Deping He, et al. The Multi-Functionality of Ultra-Light Porous Metals and Their Applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2006, 36 (4): 517-535.
卢天健, 何德坪等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. *力学进展*, 2006, 36(4): 517-535.
- [3] S. Y. Kim, J. W. Paek, B. H. Kang. Flow and Heat Transfer Correlations for Porous Fin in a Plate-Fin Heat Exchanger[J]. *Journal of heat transfer*, 2000, 122(3): 572-578.
- [4] C. Y. Zhao, W. Lu, S.A.Tassou. Thermal Analysis on Metal-foam Filled Heat Exchangers[J]. *Part II: Tube heat exchangers. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(15-16): 2762-2770.
- [5] Yinghai Li, Wenquan Tao, et al. Numerical Simulation of Convective Heat Transfer in Metal Foam Filled Pipes[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42 (3): 261-264.
李盈海, 陶文铨等. 金属泡沫管内强制对流换热的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(3): 261-264.
- [6] Juxiang Li, ShanTung Tu. Analysis on Uniformities of Flow and Heat Transfer of Fluid in Porous Metal Foam Heat Exchanger[J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2008, 34 (6): 897-900.
李菊香, 涂善东. 多孔泡沫金属换热器内流体流动和传热的均匀性分析[J]. *华东理工大学学报*, 2008, 34(6): 897-900.
- [7] Lifeng Luo, Yongshun He. Porous foam metal heat exchanger [P]. China Patent: 201 266 032, 2009.
罗立峰, 何永顺. 多孔泡沫金属换热器[P]. 中国专利: 201266032, 2009.

- [8] T. Kim, H. P. Hodson, T. J. Lu. Contribution of vortex structures and flow separation to local and overall pressure and heat transfer characteristics in an ultralightweight lattice material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(19-20): 4243-4264.
- [9] J. Tian, T. J. Lu, H. P. Hodson, et al. Cross Flow Heat Exchange of Textile Cellular Metal Core Sandwich Panels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(13-14): 2521-2536.
- [10] J. Xu, J. Tian, T. J. Lu, et al. On the Thermal Performance of Wire-Screen Meshes as Heat Exchanger Material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(5-6): 1142-1154.
- [11] T. J. Lu. Heat Transfer Efficiency of Metal Honeycombs[J]. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(11): 2031-2040.
- [12] T. J. Lu, H. A. Stone, M. F. Ashby. Heat Transfer in Open-Cell Metal Foams[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(10): 3619-3635.
- [13] T. Kim, C. Y. Zhao, H. P. Hodson, et al. Convective Heat Dissipation with Lattice-Frame Materials[J]. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(8): 767-780.
- [14] Yongjun Chen. Research of Porous metal honeycomb substrate preparation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004.
- 陈勇军. 多孔金属蜂窝载体制备工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [15] Karpov, Keming Sun, Yongjin Li. Based on solid/gas eutectic unidirectional solidification method of preparation of porous materials[P]. China Patent: 101 173 332, 2008.
- 卡尔波夫, 孙克明, 李勇进. 基于固/气共晶定向凝固制备多孔材料的方法[P]. 中国专利: 101173332, 2008.
- [16] Yanxiang Li, Yuan Liu, Huawei Zhang. Directional solidification of Porous metal rules Progress[R]. Beijing: Chinese Materials Conference, 2004.
- 李言祥, 刘源, 张华伟. 定向凝固规则多孔金属研究进展[R]. 北京: 中国材料研讨会, 2004.
- [17] Yanxiang Li, Yuan Liu, Huawei Zhang. GASAR and Gasarite research[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2004,1: 9-11.
- 李言祥, 刘源, 张华伟. GASAR 和 Gasarite 研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2004, 1: 9-11.