

金属纤维多孔材料力学性能研究现状

王建忠, 许忠国, 敖庆波, 支浩, 李爱君, 马军, 汤慧萍

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

摘要: 详细论述了金属纤维多孔材料的拉伸性能、剪切性能、压缩性能和冲击性能等力学性能的研究进展, 并简要叙述了应力波在多孔材料内部传播的研究现状, 最后指出未来应加强金属纤维多孔材料的动态冲击性能及应力波在多孔材料内部的传播、衰减机制研究, 从而进一步扩大金属纤维多孔材料的应用领域。

关键词: 金属纤维多孔材料; 拉伸; 压缩; 剪切; 应力波

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)06-1636-05

轻质金属多功能材料是近年来随着材料制备及机械加工技术的迅速发展而出现的一类新颖材料, 它的出现对于材料的选择及其性能研究提出了新的课题^[1]。金属纤维多孔材料是一类新型轻质金属多孔材料(图 1), 其孔结构由孔隙、烧结结点和纤维骨架构成, 它在保持高孔隙度($\geq 70\%$)的前提下, 孔径可逐渐由毫米级减小到微米甚至纳米级, 孔隙结构千变万化, 且不同构形的孔结构对材料的力学性能及其它物理特性有着显著的影响, 因而具有良好的可设计性。轻质金属纤维多孔材料独特的多尺度孔隙结构使其表现出一系列传统材料所不具备的多功能集成特性, 如高比强度、高比刚度、高强韧、高能量吸收等优良机械性能, 以及高效吸声降噪、强化传质传热、阻燃防爆、过滤分离等特殊性质^[2-4], 兼具功能和结构双重作用, 是一种性能优异的多功能工程材料, 具有广阔的应用前景。

金属纤维多孔材料的力学性能是影响其大规模应用的关键指标之一, 为此本研究针对该多孔材料的拉伸性能、剪切性能、压缩性能、冲击性能等力学性能进行了较为系统的总结和分析, 并对应力波在金属纤维多孔材料中的传播过程进行了评述, 指出未来应系统研究金属纤维多孔材料的动态冲击性能及应力波在其内部的传播、衰减机制, 从而进一步扩大金属纤维多孔材料的应用领域。

1 力学性能研究现状

国内外主要针对金属纤维多孔材料的准静态拉伸性能、剪切性能、压缩性能和冲击性能等开展了大量研究, 取得了许多科研成果。

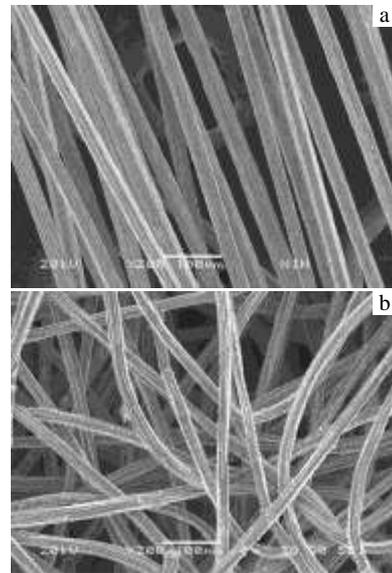


图 1 金属纤维束及多孔材料的微观结构

Fig.1 Microstructures of metal fiber bundle (a) and the porous materials (b)

1.1 拉伸性能

俄罗斯 Kostornov 教授研究了金属纤维多孔材料室温下的拉伸性能^[5] (加载速度为 10~25 mm/min), 结果表明, 孔隙度越高, 多孔材料的比例极限越小且呈非线性变化; 当加载应力超过材料的比例极限时, 多孔材料开始卸载, 即出现了弹性卸载阶段; 卸载完成后, 残余塑性变形量等于总应力分量与弹性应力分量之差; 再次加载时, 拉伸曲线几乎与卸载曲线一致,

收稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51301141, 51134003); 国家“973”计划 (2011CB610302); 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金 (KFJJ15-02M)

作者简介: 王建忠, 男, 1980 年生, 博士后, 高级工程师, 西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231095, E-mail: wangjz20012001@163.com

从而完成一次加载-卸载循环(图 2)。这一特殊现象主要与金属纤维多孔材料的结构有关。金属纤维多孔材料的孔隙度越高，初期失效前的总变形量越大。Kostornov 教授还探讨了 Ni-Cr 合金纤维多孔材料在室温和高温(600~1100 °C)下的力学性能^[6]，研究表明，当载荷超过材料的抗拉强度时，材料局部发生断裂，随后载荷发生重新分布，并未出现材料的瞬间破坏；拉伸试验过程中，金属纤维多孔材料发生大量的弹塑性变形，具有较高的韧性；随着孔隙度的增加，金属纤维多孔材料的延伸率逐渐降低，但其延伸率远高于相同孔隙度的金属粉末多孔材料；室温下，金属纤维多孔材料的抗拉强度为 150 MPa，当温度从 600 °C 升高到 1100 °C 时，其抗拉强度从约 65 MPa 下降到约 30 MPa。P. Ducheyne 等^[7]采用直径为 50 和 100 μm 的 316L 不锈钢纤维制备了低孔隙度的金属纤维烧结板，并对其拉伸强度进行了研究。Clyne 和 Markaki 采用液相烧结和电镀法制备了孔隙度为 75%~95% 的不锈钢纤维烧结板，其抗拉强度低于 1 MPa^[8,9]。

西北有色金属研究院开展了孔隙度、复烧工艺对不锈钢纤维多孔材料拉伸性能的影响研究。结果表明，孔隙度对多孔材料的拉伸性能影响显著。随着孔隙度的增加，多孔材料的屈服强度、抗拉强度均逐渐减小，应力应变曲线呈现由下向上的梯度排列(图 3)。另外，多孔材料的断口形貌与烧结结点的强度密切相关，而复烧是提高多孔材料拉伸性能的有效途径^[10]。

华南理工大学的研究表明^[4,11]，铜纤维多孔材料的拉伸破坏过程分为 4 个过程，即三维网状金属骨架的塑性变形、铜纤维绕结点的塑性偏转、结点和纤维丝体的塑性延展、网状骨架结构的整体破坏。多孔材料断口方向与拉伸载荷方向呈 45°，且与最大剪应力方向基本保持一致，但并未出现塑性拉伸断裂过程中的整体颈缩现象。抗拉强度随着烧结温度的增加而增加，但随着保温时间的延长而有所降低。

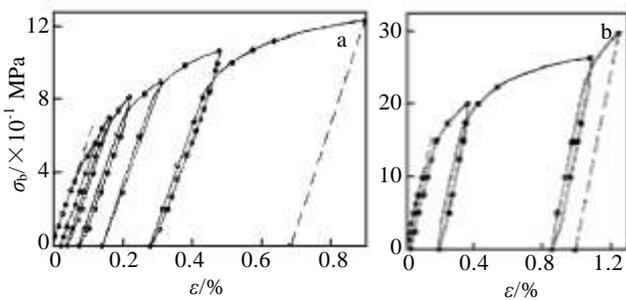


图 2 纤维多孔材料拉伸过程中的弹性卸载曲线

Fig.2 Elastic unloading law in the tension of fibrous materials, $\theta = 25\%$ (a) and 66% (b)^[5]

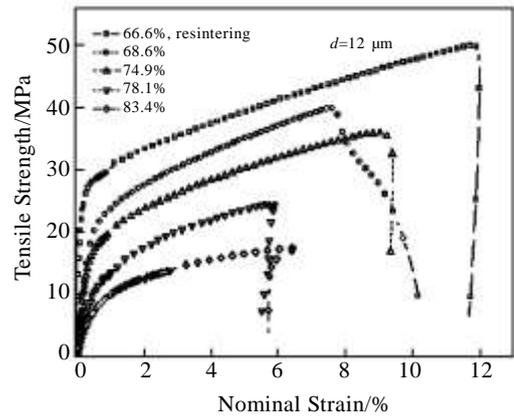


图 3 不同孔隙度多孔材料的拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curves of porous materials with different porosities^[10]

1.2 剪切性能

金属纤维多孔材料在某些应用领域还受到剪切力的作用，因此其剪切性能也受到了关注。金属纤维多孔材料典型的剪切应力-应变曲线如图 4 所示^[10,12]，其大致分为 3 个阶段：应变很低情况下的线性弹性阶段、塑性变形阶段和应力破坏阶段。随着孔隙度的增加，多孔材料的剪切强度、断裂强度和卸载模量均逐渐减小；随着纤维丝径的减小，多孔材料的剪切强度、断裂强度和卸载模量均逐渐增大；复烧工艺有利于金属纤维多孔材料烧结结点发育完全，可以显著提高其剪切性能。

1.3 压缩性能

金属纤维多孔材料的压缩应力-应变曲线光滑，其面内压缩行为可分为弹性变形阶段、塑性屈服平台阶段和致密化阶段，而且致密化阶段前多孔材料的应变均超过 50%，而厚度方向压缩变形的 3 个阶段不明显；

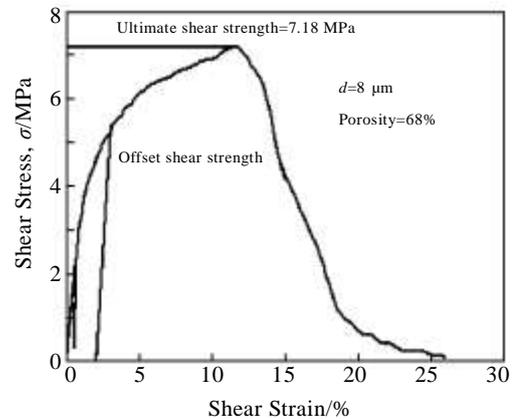


图 4 金属纤维多孔材料剪切应力-应变曲线

Fig.4 Shear strain-stress curve of porous metal fibrous materials

金属纤维直径相同时，随着孔隙度的增加，多孔材料的压缩强度、屈服强度均减小；多孔材料的弹性模量随着孔隙度的增大而减小；烧结工艺对金属纤维多孔材料的压缩性能影响很大^[10,13,14]。采用冶金工艺制备孔隙度为 33.90%~56.27%、孔径为 25~1300 μm 的多孔钢丝网的压缩性能表明^[15]，随着孔隙度增大，多孔钢丝网屈服强度和弹性模量降低。当孔隙度从 33.90% 增加到 56.27% 时，其屈服强度从 46.9 MPa 降低到 14.8 MPa，弹性模量从 1.42 GPa 降低到 0.42 GPa。华南理工大学的研究表明^[4,11]，铜纤维多孔材料在经过单向压缩性能测试后的外观仍然具有规则的三维矩形块形状，仅在高度方向上变化较为显著，长度和宽度方向变化不大。孔隙度对铜纤维多孔材料的压缩性能影响很大，孔隙度越高，相同应变条件下的应力值越低。提高烧结温度或延长保温时间，均将不同程度的降低同一应变条件下的应力值。

金属纤维多孔材料压缩应力-应变曲线出现的塑性屈服平台阶段使得其具有良好的能量吸收效率。研究表明随着孔隙度的降低，多孔材料的能量吸收效率逐渐增大（表 1）^[14]。当孔隙度从 82.3% 降低到 64.5% 时，多孔材料的能量吸收能力(W)由 7.17 MJ/m³ 增加到 25.75 MJ/m³。当孔隙度超过 90% 时，多孔材料的能量吸收能力很小^[16]。

P. Ducheyne 等^[7]采用 Φ50 μm 和 Φ100 μm 的 316L 纤维制备了低孔隙度的金属纤维多孔材料，并对其压缩强度进行了研究。

1.4 冲击性能

金属纤维多孔材料的准静态压缩性能与其孔结构密切相关，上述研究成果对多孔材料的制备具有较好的指导作用。然而，该材料用于冲击防护领域时，需要对其冲击性能进行系统研究。近年来关于金属纤维多孔材料在冲击载荷作用下的压缩性能、变形行为及损伤机制的研究很少，主要集中于泡沫金属材料^[17-19]。由于泡沫金属材料与金属纤维多孔材料的制备工艺不同，二者的孔结构存在较大差异，因此金属纤维多孔

材料有别于泡沫金属材料的动态压缩性能、变形行为及损伤机理需要深入研究。

西北有色金属研究院在国家“973”计划项目“超轻多孔材料和结构创新构型的多功能化基础研究”的支持下，开展了金属纤维夹芯板（图 5）的冲击行为研究，结果表明：高应变速率引起应力滞后，低孔隙度或纤维直径较大的夹芯板应力滞后现象有所缓解；金属纤维夹芯板是一种应变率敏感材料，随着应变率增加，应力滞后现象更明显。夹芯板受到冲击载荷并迅速传递给金属纤维多孔芯体，芯体中力是靠纤维骨架、烧结结点来传递的，而孔结构受到冲击载荷时发生变形，吸收较多的动能而影响力的有效传递，导致应力滞后。研究还表明，在相同的冲击速率下，随着孔隙度增加，夹芯板动态压缩时应力随应变增加而增大的趋势增大。相同应变下，低孔隙度样品的应力较大^[20]。但是，目前实验工作尚处于初步探索阶段，有关孔结构及材料厚度对金属纤维多孔材料动态压缩性能的影响规律及其动态变形行为与损伤机理等基础问题尚待系统分析。

瑞典哥德堡 Volvo 公司于 1988 年开发了一种夹芯结构的超轻不锈钢板材（HSSA, hybrid stainless steel assembly）并获得了专利，它采用两层薄不锈钢板，中间用环氧树脂粘结不锈钢纤维，该材料比铝更轻，刚性更好，兼具良好的隔音和防震特性。英国剑桥大学和麻省理工学院也对此材料开展了深入的研究，发现该材料比实体金属多吸收了 50%~60% 的能量^[10]。

表 1 不同孔隙度金属纤维多孔材料准静态条件下的能量吸收能力和吸收效率

Table 1 Energy absorption capacity (W) & efficiency (I) of porous metal fiber materials with different porosities under quasi-static conditions

Porosity/%	W/MJ·m ⁻³	I/%
64.5	25.75	33.75
69.2	16.30	37.34
78.0	14.68	20.93
82.3	7.17	19.13

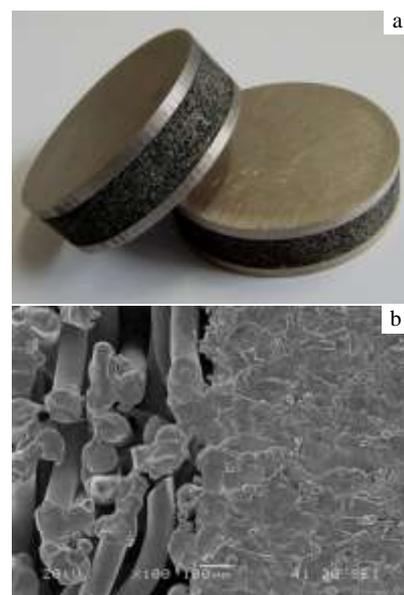


图 5 金属纤维轻质夹芯材料 SEM 照片

Fig.5 Light sandwich sheet of metal fibrous core (a) and SEM image (b)

2 应力波传播研究现状

冲击载荷作用于金属纤维多孔材料时, 多孔材料除吸收一定的冲击能量外, 其内部还会产生应力波, 而且应力波在其内部会发生大量的折射和反射, 应力波传播方向也在不断发生改变, 非均匀介质中的波动方程在原则上与均匀介质中的形式相同, 但方程中的材料属性不再是常数而是坐标的函数。由于波动方程中含有材料属性对坐标的偏导数, 问题比均匀介质中的运动微分方程更为复杂。其次, 应力波在非完全弹性介质中传播的同时会发生衰减, 其机械能在传播过程中部分地转化为热能或其他形式的能量而被耗散^[21]。由于金属纤维多孔材料不能完全作为弹性介质来处理, 因此还需要考虑应力波的衰减问题。

与传统材料一样, 结构的动态响应和应力波的传播是金属纤维多孔材料冲击动力学的两类基本问题。目前, 国内外涉及应力波在金属纤维多孔材料内部的扰动和传播问题的研究未见报道, 而主要集中于泡沫材料^[18,22]、蜂窝夹芯板^[17,23]和金属粉末多孔材料^[24,25]等。然而金属纤维多孔材料的制备工艺及孔结构与上述材料存在较大差异, 因此应力波在金属纤维多孔材料内部的传播、衰减过程及机制需要系统分析。

3 结 语

金属纤维多孔材料是一种新型轻质高性能防护材料, 具有吸能、缓冲等优异特性, 在汽车、航空航天、造船、运输等领域具有广阔的应用前景。目前, 该材料的准静态压缩、拉伸和剪切等力学性能已经取得了大量成果, 但其在冲击载荷作用下的冲击性能、动态响应以及应力波在其内部的传播、衰减等动态特性的研究还处于起步阶段, 研究工作还很不完善, 多数工作尚处于试验阶段, 理论研究模型大多较为简单, 距实际应用还有相当的距离。

参考文献 References

- [1] Yang Yazheng(杨亚政), Yang Jialing(杨嘉陵), Zeng Tao(曾涛) et al. *Chinese Quarterly of Mechanics(力学季刊)*[J], 2007, 28(4): 503
- [2] Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍). *Sintered Porous Metal Materials(烧结金属多孔材料)*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2009: 1
- [3] Zhang Bo, Chen Tianning. *Applied Acoustics*[J], 2009, 70(2): 337
- [4] Zhou Wei(周伟). *Manufacturing Process of Porous Metal Fiber Sintered Felt and Its Application Mechanism in Microreactor for Hydrogen Production(多孔金属纤维烧结板制造及在制氢微反应器中的作用机理)*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 55
- [5] Kostornov A G, Galstyan L G. *Poroshkovaya Metallurgiya*[J], 1984, 7(259): 83
- [6] Kostornov A G, Shevchuk M S, Gorb M L. *Poroshkovaya Metallurgiya*[J], 1972, 4(112): 88
- [7] Ducheyne P, Aernoudt E, Meester P D. *J Mater Sci*[J], 1978, 13: 2650
- [8] Tan J C, Clyne T W. *Advanced Engineering Materials*[J], 2008, 10(3): 201
- [9] Markaki A E, Gergely V, Cockburn A et al. *Composites Science and Technology*[J], 2003, 63(16): 2345
- [10] Wang Jianyong(王建永). *Study of Mechanical Properties of the Sintered Metal Fibrous Materials(烧结金属纤维多孔材料力学性能研究)*[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2008: 32
- [11] Zhou W, Tang Y, Pan M Q et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2009, 525: 133
- [12] Wang Jianyong(王建永), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊) et al. *Journal of Functional Materials(功能材料)*[J], 2010, 41(S3): 565
- [13] Qiao Jichao(乔吉超), Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2008, 37(12): 2173
- [14] Qiao J C, Xi Z P, Tang H P et al. *Materials Transactions*[J], 2008, 49(12): 2919
- [15] Qiao Jichao(乔吉超), Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(3): 561
- [16] Wang Jianyong(王建永), Tang Huiping(汤慧萍), Zhu Jilei(朱纪磊) et al. *Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术)*[J], 2009, 27(5): 323
- [17] Wang Zhihua(王志华), Zhang Yifen(张银飏), Ren Huilan(任会兰) et al. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astromica(中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学)*[J], 2009, 39(9): 1258
- [18] Kang Jianguo(康建功), Shi Shaoqing(石少卿). *Journal of Vibration and Shock(振动与冲击)*[J], 2010, 29(5): 199
- [19] Jing Lin. *The Dynamic Mechanical Behavior and Failure Mechanism of Sandwich Shells with Metallic Foam Cores under Intensive Loading(强动载荷作用下泡沫金属夹芯壳结构的动力学行为及其失效机理研究)*[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012
- [20] Wang Jianyong(王建永), Tang Huiping(汤慧萍), Xi

- Zhengping(奚正平) *et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2010, 15(4): 378
- [21] Lu Tianjian(卢天健), He Deping(何德坪), Chen Changqing(陈常青) *et al. Advances in Mechanics*(力学进展)[J], 2006, 36(4): 517
- [22] Zou Guangping(邹广平), Chang Zhongliang(唱忠良), Ming Ruhai(明如海) *et al. Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 2009, 30(S2): 276
- [23] Gardner N, Wang E, Shukla A. *Composite Structures*[J], 2012, 94: 1755
- [24] Zheng Zhoushun(郑洲顺), Xu Qinwu(徐勤武), Zhu Yuanpeng(朱远鹏) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(4): 888
- [25] Wang Jianzhong, Yin Haiqing, Qu Xuanhui. *Frontiers of Materials Science in China*[J], 2009, 3(3): 319

Status quo of Mechanical Properties of Porous Metal Fibrous Materials

Wang Jianzhong, Xu Zhongguo, Ao Qingbo, Zhi Hao, Li Aijun, Ma Jun, Tang Huiping

(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The present paper focused on the research progress of tensile, shear, compressive and impact properties of porous metal fibrous materials and the status quo on the stress wave propagating in the material was briefly discussed. In order to expand the application fields of porous metal fibrous materials, their dynamic shocking performance and the stress wave propagation and attenuation should be studied in the future.

Key words: porous metal fibrous materials; tension; compression; shear; stress wave

Corresponding author: Wang Jianzhong, Senior Engineer, State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: wangjz20012001@163.com