

不锈钢纤维多孔材料的能量吸收性能*

敖庆波, 王建忠, 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, 西安 710016)

摘要: 以不锈钢纤维毡为原料, 通过配料及高温烧结得到不锈钢纤维多孔材料。对不同孔结构的不锈钢纤维多孔材料进行压缩性能测试, 经计算得到能量吸收值。结果表明, 随着烧结结点数量的增加, 不锈钢纤维多孔材料的能量吸收能力有所提高; 在丝径为 $8\sim 28\ \mu\text{m}$ 之间, 改变材料的丝径, 对改变纤维多孔材料的能量吸收能力影响不大; 随着孔隙度的降低, 纤维多孔材料的能量吸收性能有明显提高。

关键词: 不锈钢纤维毡; 烧结结点; 孔隙度; 丝径; 能量吸收性能

中图分类号: TB34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2019.01.024

0 引言

金属纤维多孔材料是一类重要的功能材料, 不仅具有较好的降噪性能: 单一结构在中高频范围内具有较好的吸声性能, 吸声系数最高达 0.95, 梯度结构在高于 1 500 Hz 的频率范围内可保持稳态吸声系数高于 0.9, 通过复合金属薄膜材料在中低频达到平均吸声系数高于 0.3^[1-6]; 还具有独特的力学性能, 如其在受压缩过程中, 具有较长的屈服平台, 这说明金属纤维多孔材料具有较好的屈服强度^[7-10]; 在换热传热方面也有很好的表现: 在 $\Delta T < 20\ \text{℃}$ 的过热度范围内, 纤维多孔材料的池沸腾换热性能是紫铜基板池沸腾换热性能的 2~5 倍^[11-14]。由于其良好的综合性能, 外加其耐高温、抗氧化、耐热腐蚀性能也很好, 在各个环境要求苛刻的领域有着很好的应用前景。

但在目前有关金属纤维多孔材料的相关研究中, 系统研究其能量吸收性能的工作还未见报道, 多数文献中报道的均为其拉伸及压缩性能, 而在实际应用中, 较为关注的性能参数为材料的能量吸收值。为更全面的了解金属纤维多孔材料的能量吸收特性及对实际应用中提供更好的数据支持, 本文分析了烧结结点数量、材料孔隙度、纤维丝径对多孔材料能量吸收值的影响规律。

1 实验

1.1 样品的制备

原料: 316L 纤维毛毡, 丝径分别为 8, 12, 20 和 $28\ \mu\text{m}$, 通过体积称重法称取一定质量的纤维毛毡, 利用真空炉对其进行高温烧结, 得到具有一定孔隙结构的金属纤维多孔材料。利用电火花线切割机在材料上分别取 $x-z$ (加载方向为 z 方向) 和 $x-y$ (加载方向为 y

方向) 两个方向上的压缩样品 (如图 1 所示)。

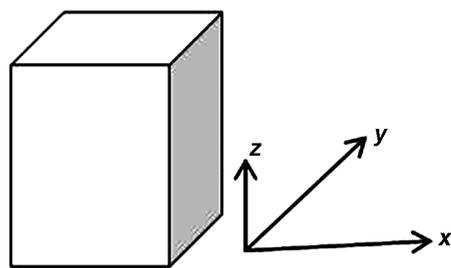


图 1 不锈钢纤维多孔材料压缩样品取样示意图

Fig 1 The sketch map of the stainless steel fiber porous materials compressive sample

1.2 分析与测试

利用电子万能材料试验机 (Instron5967), 按照 GB/T7314-2005《金属材料室温压缩试验方法》对材料的压缩性能进行测试。

2 金属纤维多孔材料的能量吸收机理及计算方法

2.1 能量吸收机理

Gibson-Ashby 理论认为泡沫金属多孔材料的压缩应力-应变过程由 3 个阶段组成: 弹性区、平台区和致密化区。金属纤维多孔材料在压缩过程中的应力-应变行为与该理论描述的现象相似 (如图 2)。金属纤维多孔材料的应力-应变曲线大致分为 3 个阶段: 在应变很低情况下的线性弹性变形区、塑性屈服平台区和应力急剧增大情况下的致密化区。

在弹性变形阶段, 应力迅速增加, 应变增加不大, 在此阶段当外力取消后多孔材料将恢复原有形状和尺寸。当应变 ϵ 增加到一定数值时, 压缩应力达到多孔材料的屈服强度 σ_s , 随后应变增加, 应力-应变曲线进入到较长的平台屈服阶段, 表现为应力增加很少而应

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51701164); 陕西省科技新星资助项目 (2018KJXX-060)

收到初稿日期: 2018-08-13

收到修改稿日期: 2018-11-19

通讯作者: 汤慧萍, E-mail: hptang@c-nin.com

作者简介: 敖庆波 (1982-), 女, 吉林磐石人, 硕士, 高级工程师, 主要从事金属多孔材料研究。

变却迅速增大,多孔材料中孔的结构被压缩变形破坏,长而平的塑性破碎段使得金属多孔材料具有高的压缩吸能性能;当压缩应力迅速增大,表明应力-应变曲线进入致密化阶段,多孔材料中构成孔隙的骨架大量接触,孔洞被压实。致密化阶段的发生表明多孔材料的作为耐撞击能量吸收的功能失效。

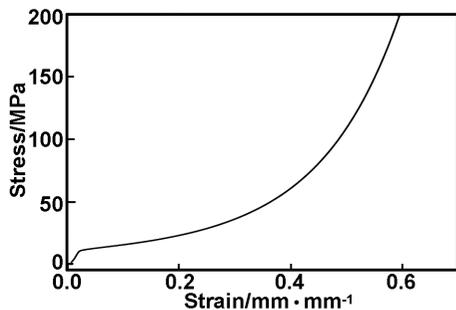


图2 金属纤维多孔材料的压缩应力-应变曲线

Fig 2 The compressive stress-strain curve of the metal fiber porous materials

2.2 计算方法

金属纤维多孔材料能量吸收性能则取决于平台屈服区的面积。由于压缩应力-应变曲线存在着较长的屈服平台区,这就意味着金属纤维多孔材料具有较强的能量吸收能力。多孔材料能量吸收的定义为:在应变区间 $[0, \epsilon_m]$ 内,单位多孔材料所吸收的能量等于压缩应力-应变曲线下的面积,即

$$W = \int_0^{\epsilon_m} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

式中, W 为吸收的能量; ϵ_m 为给定的应变; $\sigma(\epsilon)$ 为应力,是应变的函数。

一般选取 $\epsilon = 0.50$ 来计算吸收功 W ^[15]。但 $\epsilon > 0.50$ 时其实仍然处于塑性平台期,而且在曲线进入致密化阶段后一定应变下还有较强的能量吸收能力,因此,作者认为 $\sigma-\epsilon$ 曲线在塑性平台区和致密化区之间变化时存在一个拐点,该拐点应力值记作 ϵ_{max} ,即最佳计算能量吸收取值。

3 结果与分析

3.1 不同方向的金属纤维多孔材料的能量吸收性能

$x-z$ 方向的纤维多孔材料的屈服平台区较 $x-y$ 方向的纤维多孔材料的长(如图3所示),样品参数:丝径 $28 \mu\text{m}$ 、孔隙度70%,经过计算:前者的能量吸收值较后者低($x-z$ 方向为 19.6 MJ/m^3 , $x-y$ 方向为 31.59 MJ/m^3)。

3.2 孔结构对金属纤维多孔材料的能量吸收的影响

3.2.1 烧结结点数量

如图4所示,样品参数为丝径 $12 \mu\text{m}$ 、孔隙度70%,通过不同烧结温度制备而成。随着烧结温度的升高,材料内部的烧结结点数量会增多^[16]。从图4(a)可以看出,随着烧结结点数量的增加, $x-y$ 方向制得的金属纤维多孔材料的能量吸收值略有增强,但是增加

幅度很小,说明在此方向上烧结结点在材料受压缩过程中,没有起到提高抗压性能的作用。

从图4(b)可以看出,随着烧结结点数量的增加, $x-z$ 的金属纤维多孔材料的能量吸收值明显提高,表明 $x-z$ 的金属纤维多孔材料在压缩过程中,由于材料内部的结点连接着两根甚至多根纤维,纤维和结点之间的牵引力很好地抑制了外界的压力。

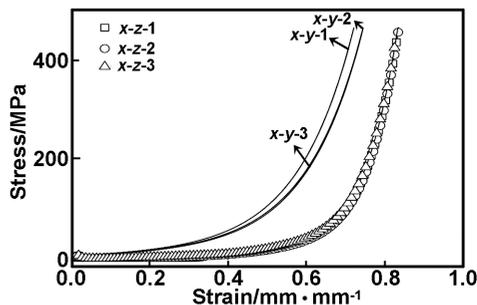


图3 金属纤维多孔材料的压缩应力-应变曲线

Fig 3 Compressive stress-strain curves of the metal fiber porous materials

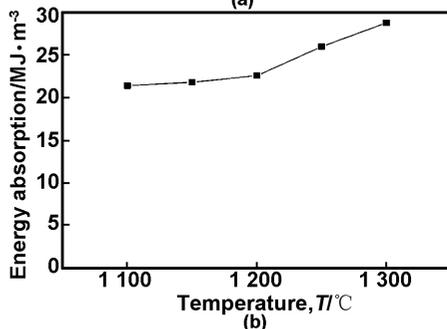
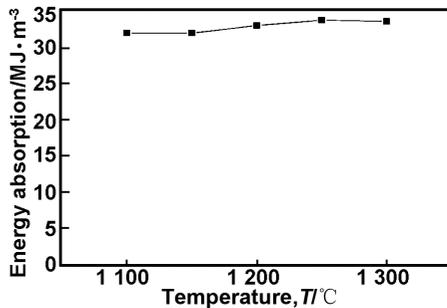


图4 $x-y$ 方向和 $x-z$ 方向的金属纤维多孔材料的能量吸收能力对比

Fig 4 Comparison of energy absorption properties of the materials between $x-y$ and $x-z$ direction

3.2.2 丝径

选取丝径分别为 $8, 20$ 和 $28 \mu\text{m}$,孔隙度为70%的金属纤维多孔材料为研究对象,对其进行压缩性能进行测试,经过计算得到能量吸收值如表1所示。从表1数据可以看出,想获得具有不同数量级能量吸收值的金属纤维多孔材料,在丝径上的选取需要寻找差别很大的纤维为原料,否则在其它结构参数均相同时,丝径在 $8 \sim 28 \mu\text{m}$ 之间进行选择,其能量吸收能力相差不多,故从实际应用的角度出发,选取成本较低的粗丝径的纤维为原料为最佳。

表 1 丝径对金属纤维多孔材料的能量吸收性能的影响

Table 1 Effects of the wire diameter on energy absorption properties of the metal fiber porous materials

MJ/m ³	8 μm	20 μm	28 μm
<i>x-y</i>	29.34	31.9	29.03
<i>x-z</i>	—	23	19.6

3.2.3 孔隙度

利用丝径为 20 μm 的纤维制备孔隙度分别为 70% 和 80% 的金属纤维多孔材料, 对其能量吸收值进行测试计算, 所得结果如表 2 所示。从计算结果可以明显看出, 不同孔隙度会导致金属纤维多孔材料的能量吸收能力有很大差别, 孔隙度越低, 材料的能量吸收能力越强; 孔隙度越高, 材料的能量吸收能力越弱。这主要原因与材料内部孔隙分布和整体的强度有关。

表 2 孔隙度对金属纤维多孔材料的能量吸收性能的影响

Table 2 Effects of the porosity on energy absorption properties of the metal fiber porous materials

MJ/m ³	70%	75%	80%
<i>x-y</i>	31.9	18	4.12
<i>x-z</i>	23	14.2	2.9

4 结 论

(1) *x-z* 金属纤维多孔材料的屈服平台区较平铺纤维多孔材料的长, 但通过计算得到的能量吸收值却较 *x-y* 金属纤维多孔材料的低;

(2) 随着烧结节点数量的增加, 金属纤维多孔材料的能量吸收能力有所提高;

(3) 在丝径为 8~28 μm 之间, 改变材料的丝径对改善金属纤维多孔材料的能量吸收能力作用不大;

(4) 随着孔隙度的降低, 金属纤维多孔材料的能量吸收能力有明显提高, 孔隙度为 70% 的不锈钢纤维多孔材料 *x-y* 方向的能量吸收值达 31.9 MJ/m³。

参考文献:

[1] Ao Qingbo, Wang Jianzhong, Li Aijun, et al. Sound absorption properties of fibrous porous metals [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(2): 387-391 (in Chinese).
敖庆波, 王建忠, 李爱君, 等. 金属纤维多孔材料的吸声性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(2): 387-391.

[2] Zhu J L, Sun J, Tang H P, et al. Gradient-structural optimization of metal fiber porous materials for sound absorption [J]. Powder Technology, 2016, 301(11): 1235-1241.

[3] Ao Qingbo. A preparation method of sound absorbing materials used in low frequency: 201510528170.1 [P]. 2015-08-26 (in Chinese).

敖庆波, 一种低频吸声材料的制备方法: 201510528170.1 [P]. 2015-08-26.

- [4] Ao Qingbo. A preparation method of sound absorbing materials used in intermediate frequency: 201510530304.3 [P]. 2015-08-26 (in Chinese).
敖庆波. 一种中频吸声材料的制备方法: 201510530304.3 [P]. 2015-08-26.
- [5] Meng H, Ao Q B, Ren S W, et al. Anisotropic acoustical properties of sintered fibrous metals [J]. Composites Science and Technology, 2015, 107(11): 10-17.
- [6] Ren S W, Ao Q B, Meng H, et al. A semi-analytical model for sound propagation in sintered fiber metals [J]. Composites Part B, 2017, 126(1): 17-26.
- [7] Wang J Z, Tang H P, Qian M, et al. Fabrication of high strength and ductile stainless steel fibre felts by sintering [J]. JOM, 2016, 68(3): 890-898.
- [8] Feng P, Liu Y, Wang Y, et al. Sintering behaviors of porous 316L stainless steel fiber felt [J]. J Cent South Univ, 2015, 22(3): 793-799.
- [9] Liu Huaili, Wang Jianzhong, Tang Huiping. Tensile properties of stainless steel fiber porous materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 2023-2026 (in Chinese).
刘怀礼, 王建忠, 汤慧萍. 不锈钢纤维多孔材料拉伸性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(8): 2023-2026.
- [10] Tang Huiping. Porous metal fiber materials — pore structure & performance [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016: 140-149 (in Chinese).
汤慧萍. 金属纤维多孔材料—孔结构及性能 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 140-149.
- [11] Zhi Hao, Tang Huiping, Zhu Jilei, et al. Effect of pore structure of Cu fiber porous materials on pool boiling heat transfer [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(2): 667-671 (in Chinese).
支浩, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. 紫铜纤维多孔材料的孔结构对池沸腾换热性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(2): 667-671.
- [12] Zhi Hao, Zhu Jilei, Wang Jianzhong, et al. Heat transfer on porous metal fibers surface with different porosity and thickness [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(18): 82-85 (in Chinese).
支浩, 朱纪磊, 王建忠, 等. 不锈钢纤维丝径对多孔表面池沸腾换热性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(18): 82-85.
- [13] Huang Jinyin, Qu Zhiguo, Li Dingguo, et al. Heat transfer performance of pool boiling on horizontal surface sintered with copper fiber felt [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(S1): 26-30 (in Chinese).
黄金印, 屈治国, 李定国, 等. 紫铜纤维毡水平表面的池沸腾换热性能 [J]. 化工学报(增刊), 2011, 62(S1): 26-30.