

泡沫金属的性能及应用研究进展

左孝青¹, 孙加林²

(1. 昆明理工大学 材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明贵金属研究所, 云南 昆明 650221)

摘要: 对泡沫金属的性能和应用研究现状进行了全面综述, 性能方面主要包括泡沫金属的力学性能、能量吸收性、热性能、导电性能、声学性能及阻尼性, 应用方面主要进行了结构和功能应用的分析, 并就泡沫金属的性能和应用发展的前沿问题进行了讨论, 指出了性能研究和应用研究的发展方向, 对泡沫金属的性能研究和应用开发具有重要意义。

关键词: 泡沫金属; 性能; 应用; 综述

中图分类号: TB383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)01-0013-05

Properties and Applications of Foamed Metals

ZUO Xiao-qing¹, SUN Jia-lin²

(1. Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Kunming Precious Metals Institute, Kunming 650221, China)

Abstract: The properties and applications of foamed metals are reviewed. The section of property demonstrates mechanical property, energy absorption, thermal capacity, conductance, sound absorption and dumping performance of metal foams, while another section introduces many structural and functional applications. In addition, further developing tendency of property research and applications of foamed metal are put forward. Therefore, there exists a great significance for both the property research and application of cellular metals.

Key words: foamed metals; properties; applications; review

0 引言

泡沫金属一种是集力学性能、热电性能、声学等性能于一体的宏观结构-功能一体化的材料,是多种结构或装置(如超轻结构、冲击缓冲、散热和热交换等)的可选材料。泡沫金属的多功能特性对应用的决定作用非常明显,应结合应用对象,进行与功能组合对应的结构-性能优化设计。文中就泡沫金属的性能研究和应用进行了详细综述,并对进一步发展的前沿性问题进行了讨论,提出了性能研究及应用发展的建议。

1 泡沫金属的性能

1.1 结构特征^[1]

泡沫金属从结构上可分为闭孔和通孔泡沫金属两种。前者含有大量独立存在的气孔,而后者则是连续贯通的三维多孔结构。其结构表征参数主要有孔隙率、孔径、通孔度、比重及比表面积等。一般来说,多孔泡沫金属材料具有如下几个结构特征:(1)重量轻,比重小:泡沫金属是金属和气体的混合物,比重仅为同体积金属的 $1/50 \sim 3/5$;(2)高孔隙率:一般多孔泡沫金属的孔隙率为 $40\% \sim 90\%$,而海绵状发泡金属材料孔隙率可高达 98% ;(3)比表面积大:泡沫金属的比表面积可达 $10 \sim 40 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$;(4)孔径范围较大:通过工艺控制,可获得的孔径在微米至厘米级之间。

1.2 性能

影响泡沫金属性能的因素有:(1)基体金属的性能;(2)相对密度;(3)孔结构类型(开口或者闭孔);(4)

收稿日期:2004-04-07. 基金项目:云南省自然科学基金重点项目(项目编号:2000E0003Z).

第一作者简介:左孝青(1964~),男,副教授. 主要研究方向:多孔材料. E-mail: zqxqdzhm@hotmail.com

孔结构的均匀性;(5)孔径大小;(6)孔的形状和孔结构的各向异性;(7)孔壁的连接性;(8)缺陷(如孔壁的不完整性等),以上因素中,相对密度对泡沫金属性能的影响最大^[2].

1.2.1 机械性能

1) 杨氏模量. 开孔泡沫与闭孔泡沫由于结构的不同,其杨氏模量值相差很大. 开口泡沫的变形主要是通过通孔的连接部分进行的,闭孔泡沫由于闭孔间存在孔壁,所以相同密度的闭孔泡沫其杨氏模量值比开孔泡沫的大几个数量级,孔尺寸、形状对杨氏模量的影响较小^[3].

对杨氏模量影响最大的因素是泡沫的相对密度,杨氏模量与密度的关系^[4]为:

$$E/E_s = (\rho/\rho_s)^2 \quad (\text{open-cell}) \quad (1)$$

$$E/E_s = (\rho/\rho_s)^2 + (1 - \rho/\rho_s)(\rho/\rho_s) \quad (\text{closed-cell}) \quad (2)$$

式(1),(2)中, E 为杨氏模量, ρ 为密度, ρ_s 为闭孔泡沫孔结构中,孔的连接部分占总实体部分的百分比,下标 s 表示实体金属的性能.

另外,泡沫金属的变形会引起其孔结构的变化,最终导致杨氏模量的变化.一般地,杨氏模量随应变的增加而减小^[5].

2) 压缩性能及能量吸收特性. 多孔金属泡沫一般为韧性的,其压缩应力-应变曲线应变严重滞后于应力,包含一个很长的平缓段,是一种具有低、常压应力下高能量吸收特性的轻质高阻尼及能量吸收材料,适合制作轻质、耐高温、阻燃的能量(如冲击能量)吸收器.

3) 拉伸性能. 由于壁及连接边的断裂机制和相互关系的不确定性,泡沫金属的抗拉强度很难估算.一般地,其抗拉强度与其压缩应力应变曲线的平台应力相当.

1.2.2 电性能及电磁屏蔽性能

泡沫金属具有独特的导电性,使之能应用于非金属泡沫(陶瓷和塑料泡沫)所不能胜任的导电环境(如电极材料).

泡沫金属的电导性主要与泡沫基体的电导性有关.然而,泡沫金属的电导率由于:(1)其中大量非导电孔隙的存在;(2)基体中的非导电物质(如氧化物);(3)与电压降方向垂直排列的连接边和孔壁对电导不起作用等因素的影响,比实体金属的电导率要低得多.泡沫金属的电导率与相对密度的关系^[6]为:

$$\rho/\rho_0 = Z(\rho/\rho_0)^t \quad (3)$$

式中, ρ/ρ_0 -泡沫金属的相对电导率; ρ/ρ_0 -泡沫金属的相对密度; Z -常数,约等于1; t -常数,约等于2.

另外,泡沫金属还具有电磁屏蔽效应,有资料表明,铝泡沫(Alulight)的电磁屏蔽效果与相同厚度的铝板材相当,并优于相同质量的硅钢片^[7].

1.2.3 热性能

1) 熔点. 泡沫金属的熔点与基体材料的基本相同,但受泡沫中非金属相(氧化物、增粘剂等)的影响,使泡沫金属的熔点温度高于理论熔点.高温长时的氧化,甚至会使泡沫铝完全氧化为泡沫陶瓷^[8].

2) 热膨胀系数. 泡沫金属的热膨胀系数与基体材料的热膨胀系数大致相同.

3) 热导率. 泡沫金属的热导率比基体材料的热导率低得多.与导电性一样,泡沫金属的导热性主要与泡沫基体的导热本性有关,气体、辐射、对流的作用较小,但其精确计算要比其电导率复杂.热导率主要构成因素有:基体的导热、气体的导热、对流及辐射,并受表面氧化物的影响.通常情况下,仅仅考虑基体材料的导热,常用与相对密度的关系表达泡沫金属的热导率^[9].

$$s = \rho_s(\rho/\rho_s)^t \quad (4)$$

式中, s -泡沫金属的热导率, ρ_s -基体材料的热导率, ρ -泡沫金属的密度, ρ_s -基体材料的密度, t -常数(根据渗透理论,3维泡沫取值 $2^{[10]}$).

1.2.4 声学性能

1) 隔音、吸音性能. 控制噪音的方法主要有两种:隔音和吸音.泡沫铝由于密度较低,质量小,因此,在隔音上应用并不理想.泡沫铝的吸音特性与泡沫的厚度、密度、孔径及表面状态有关.一般地,吸音系数可通过:增加厚度、降低密度、适当增大孔径、增加表面开口度(表面加工、喷砂、压制、轧制、表面钻孔)、表

面加多孔面板等措施而提高。

单一泡沫结构具有较好的吸音效果,但比不上玻璃纤维类传统吸音材料,特别是在低频(1 000 Hz)以下,其吸音系数要低得多。然而,可利用泡沫金属与其他吸音材料的组合,或从吸音结构上进行改进等方法,获得高性能吸音器,如 AlSi_{12} 泡沫 + 玻璃纤维 + 空气垫的组合,表现出了优越的吸音特性^[11]。

在要求吸音、耐高温、防潮、耐久性环境中,泡沫铝比传统吸音材料有优势。

2) 结构阻尼性能。当某结构的本征频率与外界声波或震动频率发生共振时,声波或震动会被该结构所衰减。结构阻尼衰减的原因是内摩擦导致的震动能向热能的转换,产生的热量通过周围环境散发。泡沫金属的阻尼特性随孔壁厚的减小、泡沫结构中的缺陷数量的增多、泡沫中陶瓷相的增加而增大^[12]。

2 泡沫金属的应用

目前,通过现有金属材料的多孔化以实现高性能、多功能化,开发高附加价值的泡沫金属材料产品受到了广泛的关注。泡沫金属的应用应考虑其“多性能特点组合”的优势,如“低密度 + 能量吸收特性”、“低密度 + 吸音特性 + 耐热 + 不吸水”等。多孔泡沫金属的应用主要有防火和吸(隔)音板、冲击能量吸收材料、建筑板(如超轻结构组元,三明治结构材料)、半导体气体扩散盘、紧凑热交换器和核心装置、液流控制装置、热交换和热绝缘器、过滤器、声音和能量的吸收装置等。泡沫金属在航空、航天、船舶、电子、汽车制造、建筑、包装、装饰材料、体育器材等领域中的应用正在不断扩大中。

2.1 能量吸收轻量结构应用

闭孔泡沫(如铝泡沫)由于制备成本相对低,因此在结构应用上受到了广泛的关注,如承受较低压载荷下的能量吸收件等。理论上讲,泡沫金属由于孔壁上约束的减少,在应力-应变曲线上,有很长的波动平台段,会产生大的塑性应变,具有显著的能量吸收特性。然而,实际构件的表现并非如此,如在剪切带中的过早失效,以及弯曲导致的拉伸应力下低的拉伸强度等。令人鼓舞的是,已经证明如果能够在 10~1 mm 尺度上获得均匀细小的泡沫孔结构,问题就可以得到解决^[13]。因此,相应的制备技术的研究开发就显得非常必要和迫切。

多孔泡沫金属轻质、能量吸收及阻尼性能,缓冲器和吸震器是重要的用途,如汽车的结构件(防冲挡、门栏、乘员室构件);航空仪表的保护外壳,航天飞机的起落架;此外,还有提升机、转运系统的安全缓冲器、高速磨床防护罩吸能内衬;活动建筑(房)等^[14]。也可考虑用于电梯的轻形结构件^[15]、包装材料^[16]、泡沫三明治复杂结构机械零件^[17]、体育器材^[18]、装饰^[19]、水上结构件^[20]、太空船结构件^[21]等。

2.2 功能应用

2.2.1 生物医学材料

利用 Ti 或 Co - Cr 合金泡沫与人的生物相容性,可用于人体骨骼或牙齿的替代材料,Mg 泡沫也有望作为人工骨头的材料^[22],多孔 Ni - Ti 形状记忆合金由于好的机械性能、耐腐蚀性能和形状记忆效应,也可作为人体骨骼的替代物^[23]。

2.2.2 过滤分离材料

与粉末冶金微孔金属相比,通孔泡沫金属的孔径和孔隙率较大,可用于过滤液体、空气或其它气流中的固体颗粒或某些活性物质。泡沫金属过滤器主要用于从液体(石油、汽油、致冷剂、聚合物熔体、含水悬浮液)、空气或其它气流中滤掉固体颗粒^[1]。

2.2.3 热交换器材料

通孔铜和铝泡沫可作为热交换器材料^[24]。通孔规则排列的孔结构,在不降低热交换效率的前提下,可减小压力降,在微电子等高(热)能量领域有广泛的应用前景。

2.2.4 催化载体

由于金属泡沫在韧性和热导率方面的优势,是催化载体材料的又一选择^[25],如将催化剂浆料涂于薄的泡沫金属片表面,后通过成型(如轧制)和高温处理,可以用于电厂废气氮氧化物(NO_x)等的处理。

2.2.5 液体的存储与传输^[26]

与传统的粉末冶金材料(如自润滑轴承)相比,泡沫金属的液体存储量更大,应用范围更广:水的存储

和缓慢释放进行湿度控制;香水的存储和缓慢蒸发等;在压力的驱动下,泡沫中的液体还可作毛细运动等。

2.2.6 消音材料、噪音控制

由于成本和效率方面的优势,熔模铸造法或沉积法制备的泡沫可以取代现有的消音器材料,目前已制备出最大直径100 mm的泡沫消音器^[27]。

开口刚性泡沫可以用于噪音控制^[28],对闭孔金属泡沫的噪音控制作用,也进行了研究^[29]。半圆柱状的 Alporas 泡沫铝和钢背或混凝土背组成的吸音装置已开发应用于高速公路桥、地铁的噪音控制^[30]。泡沫金属克服了石棉、玻璃棉等消音材料长期使用易老化、吸水后消声性能下降的缺点,耐热性好,在高温下不释放有害气体,不吸湿,是一种优良的环保型消音及噪音控制材料。

2.2.7 电池电极材料

开口的铅泡沫作为铅酸蓄电池的骨架,取代现有的铅网格,可以减轻电池的重量^[31];Ni 泡沫电极在可充电 NiCd 或 NiMH 电池中已有了实际的应用^[32,33]。

2.2.8 阻火器

高热导率的铝、铜泡沫可以用来阻止火焰的传播。据报道,开口泡沫可以对传播速度为550 m/s的火焰进行有效的拦截^[27]。

2.2.9 水净化

多孔金属可以减少水中溶解的离子浓度。污水通过通孔泡沫时,离子与金属泡沫的骨架发生氧化还原反应。如用铝泡沫对 Cr 离子(6价)的净化^[34]。

3 泡沫金属的性能研究及应用发展

3.1 结构—性能关系研究

泡沫金属是一种结构敏感性材料,其力学性能、电磁性能、热性能都与结构有直接的关系,最近的研究情况及研究方法主要有:

1) B. Illerhaus^[35]等人用320 kV的 XRD 管,采用 3D micro tomography 技术对铝泡沫和空心铁球的变形形貌进行了无损测量,可以测量泡沫结构分布、平均孔壁厚等,类似的 XCT(Computed X-ray Tomography)报道还有文献[36]等,为泡沫金属变形过程的实时观察提供了手段。

2) 从有限元(如 ABAQUS 等)、边界元数值模拟角度进行泡沫金属孔结构(含结构分布)和力学性能(如应力-应变关系)的关系、泡沫金属材料器件的优化设计的研究^[37]。

3) 从实体金属的变形理论出发,通过参数的变换,用于泡沫金属的力学性能研究^[38];

4) 从分形理论^[39]对结构和性能进行研究;

5) 从微观、介观的不同角度对理想和真实泡沫结构和性能进行研究。

因此,从孔结构的个体-孔单元及不同单元组合出发,采用先进的方法手段和理论,结合应用对象,研究孔结构、结构分布及其形貌对材料性能及器件使用性能的影响规律,对泡沫结构进行优化设计,为高性能金属泡沫及其产品的研制提供理论基础和依据,是目前泡沫金属性能研究的必然发展趋势。

3.2 应用

泡沫金属的研究开发已有 50 多年的历史,但真正的规模化产业应用并不多,国内这一现象尤为明显。除了制备技术、性能、成本等因素外,泡沫金属的应用发展应考虑其“多性能特点组合”的优势,可考虑通过以下方法实现:

1) 数值模拟分析,进行材料多功能使用性能的综合优化设计;

2) 材料性能比较,如金属泡沫与有机泡沫的性能比较,进行综合优化设计;

3) 与实体金属混用(如泡沫铝芯三明治板),可提高金属泡沫的力学性能、材料的性能各向同性性及可靠性。因此,需要开发金属泡沫与实体金属的连接技术,研制低成本一体化制备技术,考虑材料的腐蚀、构件(如汽车构件)的几何尺寸及尺寸精度等问题;

4) 开发高性能泡沫及其低成本连续化生产技术,提高泡沫金属的性/价比,提高金属泡沫比之于其他

非金属泡沫(如有机泡沫)的竞争力;

5) 采用系统化的新材料新投资评估体系,如材料投资方法学(IMM, Investment Methodology for new Materials)^[40],对可能的应用及投资等进行科学的评估,缩短投资开发周期,降低风险,促进泡沫金属材料产业化发展。

参考文献:

- [1] 赵增典, 张勇, 李杰. 泡沫金属的研究及其应用进展[J]. 轻合金加工技术, 1998, 26(11): 1~10.
- [2] Warren W E, Kraynik A M. Foam Mechanics: the Linear Elastic Response of Two - Dimensional Spatially Periodic Cellular Materials. Mechanics of Materials[J]. 1988, 55(1): 341~346.
- [3] Nieh T G, Higashi K, Wadsworth J. Effect of Cell Morphology on the Compressive Properties of Open - cell Aluminum Foams[J]. Mater Sci Eng A, 1999, 283: 105~110
- [4] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. 189.
- [5] Kovacic J, Simancik F. Metal Foam and Porous Metal Structure[M]. MIT Verlag, Bremen, 1999. 303.
- [6] Mepura, Data Sheets, Mepura GmbH. Ranshofen[C]. Austria, 1995.
- [7] Park E S, Poste S D. Ceramic Foams[P]. US Patent: 4808558, 1989.
- [8] Kovacic J. The Tensile Behaviour of Porous Metals Made by GASAR Process[J]. Acta Mater. 1998, 46(15): 5413~5422.
- [9] Stauffer D, Aharony A. Introduction to Percolation Theory[M]. Taylor and Francis, London, 1992. 1~10.
- [10] Degischer H P. Handbook of Cellular Metals[M]. WILEY - VCH Verlag GmbH, 2002. 235.
- [11] Kovacic J, Tobolka P, Simancik F, Metal Foam and Porous Metal Structure[M]. MIT Verlag, Bremen 1999. 405.
- [12] Degischer H P. Handbook of Cellular Metals[M]. WILEY - VCH Verlag GmbH, 2002. Foreword.
- [13] 王祝堂. 泡沫铝材: 生产工艺、组织性能及应用研究(3) [J]. 轻合金加工技术, 1999, 27(12): 1~2.
- [14] 王芳, 王录才. 泡沫金属的研究与发展[J]. 铸造设备研究, 2000, (1): 51.
- [15] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2000. 150.
- [16] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2000. 221.
- [17] Banhart J. Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams[J]. Progr Mater Sci. 2001, 46: 617.
- [18] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2000. 233
- [19] Giamei A F. Metal foams[C]. In: Banhart J, Eifert H, editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7~8 October. Bremen: MIT Press - Verlag, 1997. 63.
- [20] Cooks F H. Proc. Conf. Light Metals[C]. New Orleans, USA, 2~6 March 1986, 2: 1019.
- [21] Bende W U, Guo F H. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials[M]. Capus J M, German R M (eds), Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1992, 6: 145.
- [22] ERG Inc. Oakland[EB/OL]. USA, <http://www.ergaerospace.com>.
- [23] SEAC International B V. Kirmpen, Netherlands, Product Data sheet of "Recemat"[EB/OL]. <http://www.seac.nl>, 1998.
- [24] Lida K, Mizuno K, Kondo K. Sound Wave Control Device[P]. US Patent: 4726444, 1988.
- [25] 王月. 压缩率和密度对泡沫铝吸声性能的影响[J]. 机械工程材料, 2002, 26(3): 29~31.
- [26] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Butterworth - Heinemann, Oxford, 2000. 221.
- [27] Inco Ltd, Canada. Product Data Sheet of "Incofoam"[EB/OL]. <http://www.inco.com>, 1998.
- [28] Matsumoto I, Iwaki T, Yanagihara N. Battery electrode[P]. US Patent. 4251603, 1981.
- [29] Illerhaus B, Jasiuniene E, Kottar A, Goebels J. Processing and Properties of Lightweight Cellular Metals and Structures[C]. Edited by Amit Ghosh, Tom Sanders and Dennis Claar, TMS 2002. 271~279.
- [30] Degischer H P, Kottar A. in Metal Foams and Porous Metal Structures[M]. Banhart J, Ashby M F, Fleck N A (eds), MIT Verlag, Bremen 1999. 213~220.
- [31] Degischer H P. Handbook of Cellular Metals[M]. WILEY - VCH Verlag GmbH, 2002. 286.
- [32] Ashby M F, Gibson L J. Metal Foams[M]. Oxford Press, 1988. 86.
- [33] 张金娅, 左孝青. 通孔泡沫金属与分形理论[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2002, 27(4): 13~15.
- [34] Maine E M A. Innovation and Adoption of New Materials[D]. PhD Thesis, Cambridge University, 2000. 5~20.