

和对时间积分的光谱效率;粒子数反转随时间变化的动力学过程。

(2) 放大器内能量沉积分布,包括自发辐射放大引起的能量沉积的再分布,首次研究了包边吸收 ASE 能量沿周长的不对称分布。

(3) 泵浦期间和冷却过程中棒状放大器内的温度分布、应力分布和光束畸变。

(4) 钕玻璃参数的最佳选择,首次从实验和理论上研究了国产磷酸盐钕玻璃的荧光寿命和损耗对其增益性能的综合影响,确定了两者之间的定量关系。

4 钕玻璃固体激光器进一步发展的方向

目前,钕玻璃固体激光器进一步的发展主

要集中在以下一些方面:开拓新的系统概念设计和总体技术路线研究;根据钕玻璃放大器在工作过程中能量转换的各个环节,对放大器的各个元器件进行优化设计;提高效率,降低造价;大幅度提高负载强度,产生合适的激光脉冲宽度和波形;提高光束质量,完善大口径高效率倍频;研究靶场光学和提高靶面均匀照明,提高参数测量和光学诊断技术,精密机械技术和实验室环境工程研究等。

参 考 文 献

- [1] M. Andre, C. Bayer, D. Babonneau, 强激光技术进展, No. 2, (1994), 7.
- [2] S. Nakai, G. H. Miley (eds.), Physics of High Power Laser Matter Interactions, World Scientific, (1992), 3.
- [3] 范滇元, 激光与红外, 21 - 2 (1991), 12.

金属泡沫材料研究*

朱 震 刚

(中国科学院固体物理研究所,内耗与固体缺陷研究实验室,合肥 230031)

摘 要 金属泡沫或金属多孔材料是 80 年代后期国际上迅速发展起来的一种物理功能与结构一体化的新型工程材料。它所具备的多种优异物理性能特别是阻尼性能已引起广泛关注,并在消声、减震、分离工程、催化载体、屏蔽防护、吸能缓冲等一些高技术领域获得了广泛应用。文章着重介绍了铸造发泡法制造铝泡沫材料的技术难点。对金属泡沫材料的力学性质和阻尼特性进行了详细介绍。为金属泡沫材料开发、应用提供基础知识和信息。

关键词 金属泡沫,铸造发泡,阻尼

METALLIC FOAM MATERIALS

Zhu Zhengang

(Laboratory of Internal Friction and Defects in Solid, Institute of Solid State Physics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract Metallic foam or porous materials were developed at the end of the 80 's and applied to industry at the beginning of the 90 's. They have excellent physical properties, especially damping characteristics, so they are widely used for vibration insulation, noise elimination, electromagnetic screening and so forth. A description is given of the "casting and foaming" method for the fabrication of these

* 中国科学院开放实验室资助课题

1998 - 04 - 03 收到初稿, 1998 - 05 - 25 修回

metallic foams, and a detailed account of their mechanical and damping properties.

Key words metallic foam, casting foam, damping

1 引言

在材料科学研究中,永不改变的话题是探索新材料.随着工业和科技的发展以及社会进步,人们早就不满足于大自然提供的材料了,提出了各种各样的方法冶炼出许多合金材料、复合成各类高分子聚合物、烧结成各种陶瓷和金属间化合物...

在探索新材料的征途中,我们可以比较一下人类制造的材料和大自然直接提供的材料在结构上的差异,可能会对我们今后研制新材料有所启发(见图1).人造结构材料往往追求高致密固体,如:钢、水泥、玻璃等.而自然界往往选用胞状材料(cellular material)或称多孔材料(porous material)和泡沫材料(foam material),如:树木、骨骼、珊瑚等.一般,人们总认为致密材料强度大,而胞状材料强度小,不宜营造大型建筑或承受重负荷,但自然界却往往选用胞状材料作为大型生物或植物的构体.这里我们不妨可以给出自然界大结构尺寸概念,如:大恐龙有25架飞机那么大;红木树可高达100米,重达2500吨.这里可能是有原因的,大概胞状材料同时具备最佳刚度、强度和重量.因此,人们在探索新材料时不妨模仿与大自然提供的材料具有一样的胞状结构的材料或许是最佳选择.

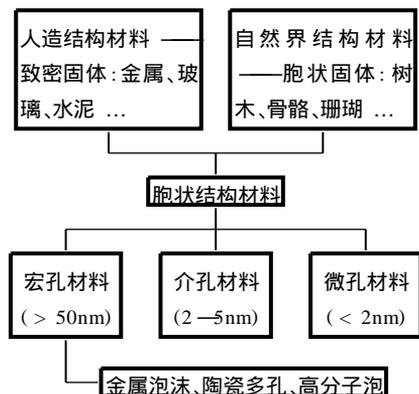


图1 新材料探索途径的一个新思路

80年代初,国际上兴起金属泡沫材料研制,发现金属泡沫材料质轻、隔音、阻燃,又有很强的吸能本领和电磁屏蔽作用,因此受到科学家和国防工业部门的高度重视.90年代起,民用工业,尤其是建筑业已开始组织生产,目前日本已上市供应大块泡沫铝材.

2 金属泡沫材料的获得

金属泡沫材料的制备方法大致可分为以下5种:(1)粉末冶金法^[1],它又可分为松散烧结^[2]和反应烧结^[3]两种;(2)渗流法^[4];(3)喷射沉积法^[5];(4)熔体发泡法^[6];(5)共晶定向凝固法^[7].

在上述众多的制备方法中,除特殊要求外,作为工业大生产最有前途的是熔体发泡法,它的工艺简单,成成低廉.目前日本上市供应的也是熔体发泡法生产的泡沫铝块件.熔体发泡法技术难点在于选择合适的金属发泡剂,一般要求发泡剂在金属熔点附近能迅速起泡.在铝泡沫材料的制备中,通常用 TiH_2 或 ZrH_2 作为发泡剂^[6].但在实际操作中,由于熔体温度很高,发泡剂投入熔体后立即起泡,无法使发泡剂均匀分散到熔体中去获得均匀发泡,这已成了熔体发泡法制备泡沫金属的技术关键.中国科学院固体物理研究所发明了氧化物包裹发泡剂的方法使发泡剂延迟起泡,待发泡剂在熔体中经充分机械搅匀后起泡^[8].该方法为制备各类金属泡沫材料奠定了基础.

此外,金属泡沫材料质量优劣的一个重要指标是孔洞尺寸和形状的均匀性.在熔体发泡法制备泡沫铝时,为了获得均匀的孔结构,熔体粘度是关键.一般控制熔体粘度有两种方法:一种是控温方法;另一种是投入增粘剂.在实际操作中,投放增粘剂是一种比较方便的方法,增粘剂选用Ca和 MnO_2 ^[9],但增粘剂会造成母体材料的污染和提高成本.中国科学院固体物理研

究所发明了摒弃投放传统增粘剂,而采用特殊专用材料作增粘材料,这既不污染,又不会提高成本,简易可行^[10].

3 金属泡沫材料的力学性质

金属泡沫材料的力学性质主要取决于材料密度大小,其次是孔径大小、类型、结构、分布等.其典型的应力-应变曲线示于图2.从图2

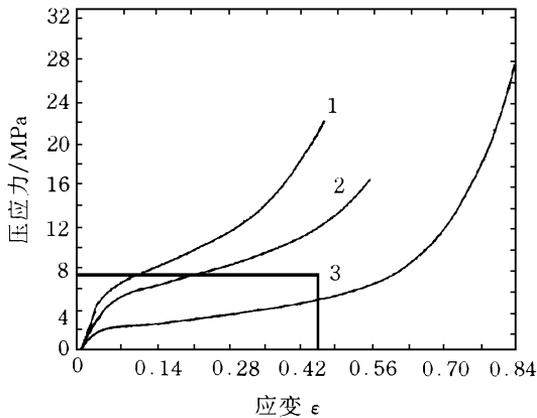


图2 金属泡沫材料压应力-应变关系

1 — $\rho_s=0.30$; 2 — $\rho_s=0.21$; 3 — $\rho_s=0.16$

我们可以看到,金属泡沫材料的应力-应变曲线可以分为3个区域,它们对应的金属泡沫材料形变变化示于图3.即在小应变时,泡沫材料是处于线性弹性形变范围,胞壁经受弹性形变;然后紧接着是应变平台区,应力几乎不变,胞壁屈服、碎碎、崩塌;最后是致密化区,胞壁被压碎或压实.各个区域范围与相对密度 ρ_s 有关, ρ_s 是泡沫材料密度, ρ_s 是块体材料密度.无论是弹性泡沫材料、塑性泡沫材料,还是脆性泡沫材料,它们的应力-应变曲线都与图2一样可分成3个区域,不同的是引起平台区的机制不一样.

从上述特性曲线我们可以看到,金属泡沫材料是一种高效吸收冲击机械能的材料.它们的吸能特性可用吸能本领(单位体积所吸收的能量 C)和吸能效率(E)来表示^[11]:

$$C = \frac{1}{0} \frac{d}{l}, \quad (1)$$

$$E = \frac{0}{\max} \cdot l', \quad (2)$$

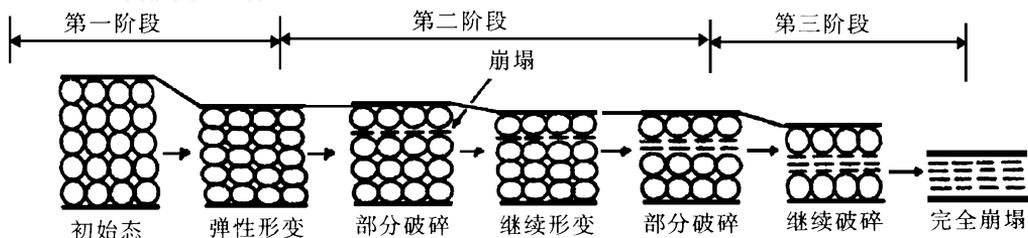


图3 泡沫铝吸能机制示意图

式中 $\sigma = f(\epsilon)$ 为压缩应力, ϵ 为应变, l 表示所考察的应变范围, σ_{\max} 为应变 l 后的最大压缩应力.

由上两式可知,吸能本领等于应力-应变曲线下所包含的面积,吸能效率则等于应变 l 时实际吸收的能量与把应力-应变曲线看成水平线时的理想吸收能量之比,其意义在于,当冲击能一定时,吸能材料所能传递的最小应力.

关于多孔固体压缩变形的本构模型较多,其中较具代表性的为 Ashby 模型^[12],其基本孔

结构模型为开孔或闭孔的立方胞(见图4).

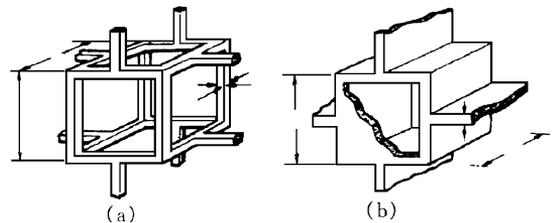


图4 Ashby 模型的基本孔结构模型

(a) 理想“开”型泡沫三维结构;

(b) 理想“闭”型泡沫三维结构

由此导出的闭孔基本方程为

$$\frac{t}{s} = \frac{I}{s^2} \quad (3)$$

$$I = \frac{\pi t^3}{12} \quad (4)$$

式中 I 为胞壁截面惯性矩, s 为胞壁长, t 为壁厚。

如果把泡沫 Al 中的孔洞近似看作球形(如图 5 所示),由简单的几何关系,也可以得到与(3), (4) 两式完全相同的关系式。

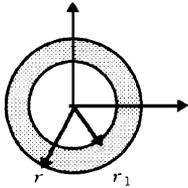


图 5 泡沫 Al 胞体模型

设胞体质量为 G , 则胞体密度为

$$\rho = \frac{G}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

胞壁材料密度为

$$\rho_s = \frac{G}{\frac{4}{3}\pi (r^3 - r_1^3)}$$

那么,

$$\frac{t}{s} = \frac{r^3 - r_1^3}{r^3}$$

因为 $t \ll r$, 所以 $r^3 - r_1^3 \approx 3r^2t$, 因此

$$\frac{t}{s} = \frac{t}{r} \quad (5)$$

显然, (5) 式与(3)式形式和意义完全相同。如果将胞壁简化为梁, 那么胞体的受压问题也可以简化为梁的弯曲问题, 可以得到(4)式, 因此由(3), (4) 两式导出的其他方程也适用于泡沫 Al。

4 金属泡沫材料的阻尼本领

我们对金属泡沫材料的阻尼本领用粘弹谱仪(美国 Imass 公司生产的 DYNASTAT)进行了实验研究, 发现:

(1) 在孔径一定时, 金属泡沫材料的阻尼本领随孔隙率的增大而增大; 在孔隙率一定时, 金

属泡沫材料的阻尼本领随孔径的减小而增大(见表 1, 表 2)。

表 1 相同孔径的泡沫铝内耗实验

孔径/mm	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
孔隙率/%	52	58	65	69	76
内耗/ 10^{-2}	4.1	4.9	6.4	6.8	7.3

表 2 相同孔隙率的泡沫铝内耗实验

孔隙率/%	77.2	77.2	77.2
孔径/mm	1.0	2.0	3.0
内耗/ 10^{-2}	8.2	5.0	2.3

(2) 金属泡沫材料的阻尼本领在低频范围内(0.04—4Hz)与频率无关(见图 6)。

(3) 金属泡沫材料的阻尼本领在滞弹性范围内随振幅增大而增大, 呈正常振幅效应(图 7)。

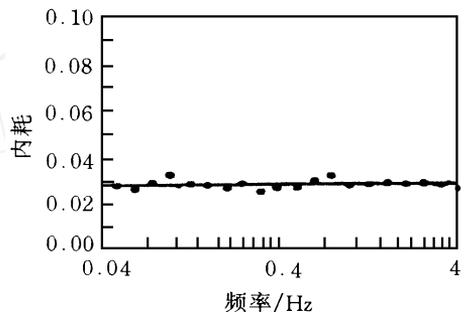


图 6 泡沫铝内耗与频率的关系

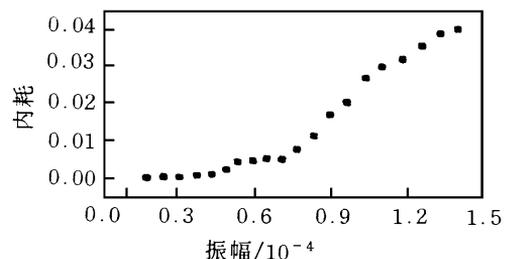


图 7 泡沫铝内耗与振幅的关系

金属泡沫材料有很高的阻尼本领。为解释它的阻尼特性, 我们可以将金属泡沫材料看成由金属骨架(基体)和近似均匀分布的孔洞两相组成[见图 8(a)]。当泡沫金属在外力作用下振动时, 由于其内部结构存在大量的宏观缺陷(孔洞), 在孔的边界产生应力模式转换^[13]: 正应力转换为切应力或反之, 这样使得内部的应力、应

变发生扰动,随即产生应力集中^[14].这表明泡沫铝中的宏观缺陷所引起的应力、应变变化比较大,也就是孔洞发生膨胀和畸变比较大.泡沫金属中的比表面积越大,则膨胀和畸变也越大^[15].

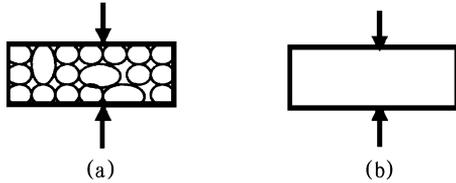


图 8

(a) 含一定浓度夹杂物的材料;(b) 无孔参考比较材料

根据 8(a),(b) 的简单模型,我们可以把金属泡沫材料中的孔洞看作材料中的夹杂物,这样采用等效夹杂物方法^[16]就可以计算出膨胀和畸变能密度^[17],即其内耗值:

$$Q^{-1} = \frac{1}{a} \cdot \frac{c}{1-c} \quad (6)$$

式中 c 为夹杂物的体积分数, a 为孔的半径. 从该公式可得出:(1) 孔径一定(即 a 为常数),内耗值随孔隙率 c 增加而增加;(2) 孔隙率一定(即 c 为常数),内耗值随孔径增加而减小. 理论分析与实验结果符合得很好.

5 金属泡沫材料的应用

金属泡沫材料除上述特性外,还不易燃,不易氧化,耐候性好,因此它有广泛应用前景.我们可以知道它作为阻尼、吸振、吸声、热和电磁

屏蔽材料是非常理想的,其潜在的主要应用领域有建材、汽车、船舶、机车、军工、包装以及重型工业.

参 考 文 献

- [1] J. P. Drolet, *Int. J. Powder Met. Powder Tech.*, **13** (1977), 222.
- [2] I. M. Fedorchenko, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, **18**(1979), 625.
- [3] J. Banhart, J. Baumeister., M. Weber, 1995 European Conference on Advanced PM Materials, Birmingham, England, October, (1995), 23.
- [4] H. A. Kuchek, US Patent, 3236706, (1966).
- [5] A. Sosnik, US Patent, 2434775, (1948).
- [6] J. C. Elliott, US Patent, 2751289, (1956).
- [7] V. Shapovalov, *MRS Bulletin*, **4**(1994), 24.
- [8] 韩福生、朱振刚等, 中国发明专利, 96117124.3, (1996).
- [9] G. J. Davies, Zhen Shu, *J. Mater. Sci.*, **18**(1983), 1899.
- [10] 韩福生、朱震刚等, 中国发明专利, 96117125.1, (1996).
- [11] P. H. Thornton, C. L. Magee, *Metall. Trans.*, **6A** (1975), 1253.
- [12] M. F. Ashby, *Metall. Trans.*, **14A**(1983), 1755.
- [13] J. Zhang, M. N. Gungor, E. J. Lavernia, *J. Mater. Sci.*, **28**(1993), 1515.
- [14] 福岛正治、藤井忠臣、北泽孝次, 日立造船技报, **49** (1988), 41.
- [15] 刘长松、韩福生、朱震刚, 物理学报, **46**(1997), 1585.
- [16] T. Mura, *Micromechanics of Defects in Solids*, The Netherlands: Martinus Nijhoff Pub., (1987).
- [17] G. P. Tandon, G. J. Weng, *J. Appl. Mech.*, **53** (1986), 511.

摩擦——一个古老而时髦的话题*

蒋 平 杨建树

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

摘 要 介绍了在原子力显微镜基础上发展起来的摩擦力显微镜的原理. 应用摩擦力显微镜可以测量原子级的摩擦力, 从而从微观上理解摩擦这一最为普遍的宏观物理现象奠定了基础. 同时, 还评述了近十年来在这一领域中理论和实验两方面的研究进展.

关键词 摩擦力显微镜, 纳米摩擦学

* 1998 - 06 - 08 收到初稿, 1998 - 09 - 14 修回