

八面体模型理论应用: 泡沫金属的弯曲强度

刘培生* 陈一鸣

(北京师范大学 物理与天文学院 射线束技术教育部重点实验室 北京 100875)

Application of the Octahedral Model Theory to Evaluating the Bending Strength of Porous Metal Foams

LIU Peisheng*, CHEN Yiming

(Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract For engineering materials, bending is also a very common loading form besides the most basic forms of tension and compression. When used as engineering components, the metal foam may be subject to bending loads. On the basis of the mechanical relationship for porous materials under bending loads, the bending property of metal foams is further studied. The relation is acquired to calculate the bending strength of metal foams, and the material structure is expanded to cellular porous products. Based on these works, the practical application of the model theory is further explored in metal foams with different structures. The research results show that the mechanical relation from the octahedral model theory is not only suitable for calculating the bending strength of reticular metal foam products, but also for calculating the bending strength of cellular metal foam products, with good calculation effects.

Keywords Porous material, Metal foam, Bending strength, Mechanical property

摘要 对于工程材料,除拉伸和压缩等最基本的载荷形式外,弯曲也是一种十分常见的载荷形式。泡沫金属在作为工程构件时就往往会受到弯曲载荷的作用。基于八面体模型理论对多孔材料在弯曲载荷形式下呈现力学关系的初步工作,文章对泡沫金属的弯曲性能进行进一步的研究:一是获得对泡沫金属弯曲强度进行计算的关系表征,二是拓展材料结构形式到胞状孔隙产品。在此基础上,进一步探讨该模型理论对不同结构型式泡沫金属弯曲强度计算的实践应用。研究发现,文中八面体模型理论所得关系公式既可适于网状泡沫金属制品的弯曲强度计算,也可适于胞状泡沫金属制品的弯曲强度计算,计算效果良好。

关键词 多孔材料 泡沫金属 弯曲强度 性能模型

中图分类号:TB383

文献标识码:A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202409003

作为一种性能优秀而且制备工艺成熟的工程材料,泡沫金属多孔材料以其一定的强度和延展性而适用于生物移植、航空航天和能源业等领域^[1]。此时该类材料除可能受到拉压等基本载荷,还常常会遇到弯曲形式的载荷作用^[2-6]。泡沫金属在医学方面的应用就是这样^[2,5],此时抗弯强度就成为其重要指标之一^[2,5]。例如^[1]:大家熟知的种植牙在撕咬过程中就不免产生弯曲、扭转等载荷作用;尺度较大的人工骨骼在使用过程中同样会处处受到弯曲

载荷作用;而泡沫金属电极在电池生产过程中,则更是对抗弯强度指标提出了特别的要求。在前期工作中,作者基于自建多孔材料八面体模型^[7],对泡沫金属承受弯曲载荷作用所呈现的力学关系进行了初步的探讨^[8-9]。其工作主要是对发生失效破坏时多孔材料构件所能承受的最大名义弯矩进行表征。本文在此基础上,从前期所得理论关系进一步导出对应多孔制品的弯曲强度表征,并将该强度表征从网状结构的泡沫金属拓展到胞状结构的泡沫

金属。根据实际多孔制品的有关实验数据, 研究所得性能关系在其弯曲载荷形式下的实践应用, 验证该模型理论对泡沫金属弯曲强度表征的实用效果。

1 泡沫金属弯曲性能的数理表征

根据多孔材料简化结构模型即体心立方结构式的八面体模型, 建立了多孔材料八面体模型理论体系, 推演得到了关于多孔材料的系列物理和力学性能的数理关系^[8]。

1.1 对于网状结构的泡沫金属 (网状泡沫金属)

基于多孔材料八面体结构模型^[7], 可便捷地推演得到网状结构泡沫金属在弯曲载荷作用下的有关力学关系 (参见图 1)。对于各向同性的三维网状

高孔率多孔材料, 在弯曲载荷作用下发生失效破坏时, 其构件所能承受的最大名义弯矩有如下表达^[8-9]:

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} \cdot (1-\theta)^{1/2} \right] \cdot M_{\text{MAX}} \approx K_B \cdot (1-\theta)^m \cdot W \cdot [\sigma] \quad (1)$$

式中 θ 为多孔制品的孔隙率; M_{MAX} 是多孔体构件所能承受的最大弯矩; K_B 是对应的泡沫金属材料常数 (取决于多孔体材质和制备工艺); W 为多孔体构件的弯曲截面模量 (抗弯截面系数); $[\sigma]$ 为孔棱材质对应的许用应力。指数项 m 是孔棱材质对应的塑性指标, 其取值范围为 1~1.5, 亦即“1.25±0.25”: 对于脆性大、刚性高的材质, 该指数趋向于上限 1.5; 对于韧性大、塑性高的材质, 该指数趋向于下限 1。

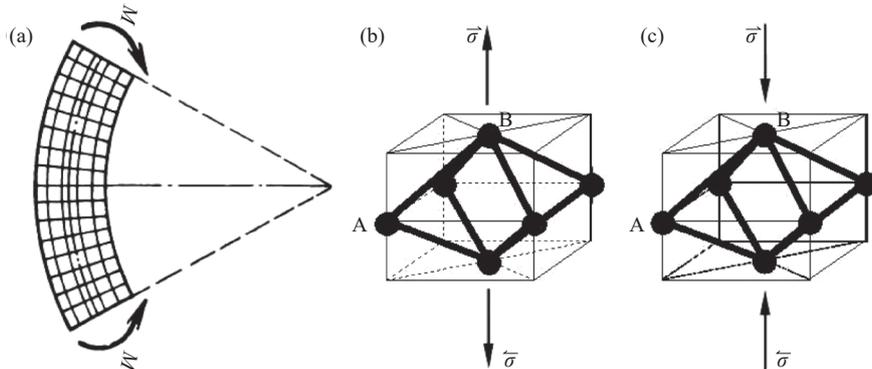


图1 多孔体在弯曲载荷作用下孔隙单元的受力分析模型(其中内应力 σ 源于弯矩 M 作用)^[8-9]。(a)弯矩 M 作用下的多孔元件, (b)中性层左侧名义拉应力, (c)中性层右侧名义压应力

Fig. 1 Octahedral unit for the porous body under bending moment^[8-9]. (a) The porous component under bending loads of bending moment M , (b) nominal tensile stress on the left of the neutral layer, (c) nominal compressive stress on the right of the neutral layer

根据工程力学和材料力学中的有关定义, 构件对于其中性轴 z 的弯曲截面模量为

$$W_z = \frac{I_z}{y_{\text{max}}} = \frac{\int_A y^2 dA}{y_{\text{max}}} \quad (2)$$

式中 I_z 是构件横截面对其中性轴 z 的惯性矩, y_{max} 是横截面上距中性轴最远点到中性轴的距离, A 是横截面的几何区域。

对于孔隙分布均匀的多孔构件, 上式(2)中实际可积的面积元则为 $(1-\theta)(dA)$ 。因此, 多孔构件的弯曲截面模量为

$$W = \frac{\int_A y^2 (1-\theta)(dA)}{y_{\text{max}}} = \frac{(1-\theta) \int_A y^2 (dA)}{y_{\text{max}}} = (1-\theta) \cdot W_z \quad (3)$$

式中 W_z 即为对应致密构件的弯曲截面模量。

将上式(3)代入式(1), 得

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} \cdot (1-\theta)^{1/2} \right] \cdot M_{\text{MAX}} \approx K_B \cdot W_z \cdot (1-\theta)^{1+m} \cdot [\sigma] \quad (4)$$

将塑性指标 m 对应的数据代入上式, 则有

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} \cdot (1-\theta)^{1/2} \right] \cdot M_{\text{MAX}} \approx K_B \cdot W_z \cdot (1-\theta)^{2.25 \pm 0.25} \cdot [\sigma] \quad (5)$$

于是由

$$\sigma = M_{\text{MAX}} / W_z \quad (6)$$

得

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} \cdot (1-\theta)^{1/2}\right] \cdot \sigma \approx K_B \cdot (1-\theta)^{2.25 \pm 0.25} \cdot [\sigma] \quad (7)$$

式中 σ 为该构件在弯曲载荷作用下发生破坏时对应于 M_{MAX} 的弯曲强度, 由构件中最大名义弯矩 M_{MAX} 与其 W_z 计算所得; W_z 为与多孔体构件形状和尺寸均相同的对应致密构件的弯曲截面模量。

将孔棱材质对应的许用应力 $[\sigma]$ 和材料常数 K_B 这两个参量进行整合, 于是得:

$$\left[1 + \frac{\sqrt{2\sqrt{3}\pi}}{12\pi} \cdot (1-\theta)^{1/2}\right] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1-\theta)^{2.25 \pm 0.25} \quad (8)$$

进一步近似有

$$[1 + 0.0875 \times (1-\theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1-\theta)^{2.25 \pm 0.25} \quad (9)$$

式中 $k_B (= K_B \cdot [\sigma])$ 也是一个材料常数或产品常数。

对应材质为塑性适中的多数泡沫金属产品, 则粗略有

$$[1 + 0.0875 \times (1-\theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1-\theta)^{2.25} \quad (10)$$

1.2 对于胞状结构的泡沫金属 (胞状泡沫金属)

胞状泡沫金属的孔壁可视为网状泡沫金属的孔棱作空间延展而演变所成, 其在原孔棱轴线处较厚而远离轴线处较薄直至通透。当多孔体承受外加载荷时, 孔壁最薄处或开口处更易产生裂纹并迅速扩展, 相当于多孔制品的宏观脆性进一步提高^[10-11]。因此, 不妨取式(1)指数段偏向于上限来表征胞状泡沫金属的弯曲性能, 即将胞状泡沫金属近似作为材质脆性加强的网状泡沫金属来处理。此时 m 取值在 1.25~1.5 的范围, 亦即“1.375±0.125”, 于是在式(9)的基础上有:

$$[1 + 0.0875 \times (1-\theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1-\theta)^{2.375 \pm 0.125} \quad (11)$$

对于一般材质的多数胞状泡沫金属产品, 则粗略有

$$[1 + 0.0875 \times (1-\theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1-\theta)^{2.375} \quad (12)$$

当然, 如果是孔隙完全闭合的胞状多孔材料, 其孔隙内部的气体也将对材料的力学性能产生一定作用。但实际上多数情况下高孔率的多孔产品都不会是这样, 其孔壁上一般都存在通透的小孔或微小缝隙(此即胞状孔隙的开口), 因此这种孔隙内部的气体作用在近似计算时大致上可以忽略。

2 模型理论的实践应用

由于研究条件的限制, 作者目前暂未能自行开展实验对上述弯曲强度的数理表征进行实践应用, 并对其进行相应的验证工作。于是, 通过查阅中国知网和 Web of Science 数据库, 找到可应用本模型理论关系进行应用计算的泡沫金属实验数据组^[2-4], 由此也可检验本模型理论关系的可行性和实用性。在规范引用这些数据的前提下, 开展这一工作。其实, 对于理论模型的实用性, 科技界很多研究者认为, 有他人团队的研究数据来验证, 比模型理论建立者本身开展实验获取数据的自证, 往往更具说服力。当然, 这里的“他人团队”应与模型理论建立者无任何利益关系(首选“陌生”团队)。

2.1 网状结构的泡沫钽

2.1.1 实验材料

文献[2]中报道了一种拟作为小梁骨之用的网状结构泡沫钽。在真空环境下, 采用激光熔融的增材制造技术, 以尺寸在 15~45 μm 之间的球形钽颗粒为原材料, 获得了孔隙全部连通的网状泡沫样品(参见图2)。增材制造工艺参量的可调节性很高, 因此样品的孔隙率可较好地控制在预期的 60%、70% 和 80% 这三级水平。增材制造过程中在样品内部产生的残余热应力, 通过退火工艺得以消除。利用数控线切割的方式, 将样品的尺寸和形状都加工到符合对应测试的要求。

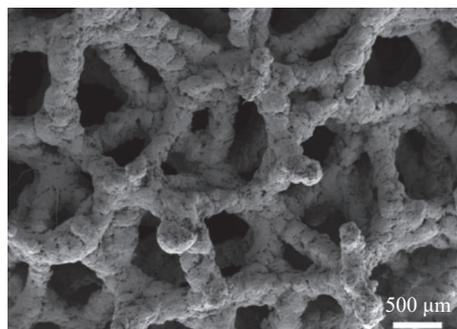


图2 泡沫钽样品的孔隙结构 SEM 图像^[2]

Fig. 2 SEM image of porous structure in the tantalum foam sample^[2]

按照美国材料实验协会 ASTM E290-14 的材料弯曲测试标准, 使用型号为 SUNS-TTM502 (Max. 200 kN) 的万能试验机对样品进行三点弯曲实验。样品的有效尺寸为 50 mm × 5 mm × 5 mm (长×宽×高), 每个孔隙率水平的样品均检测 6 件(参见图3), 取

测试结果的平均值,所得弯曲强度等相关数据列于表 1。

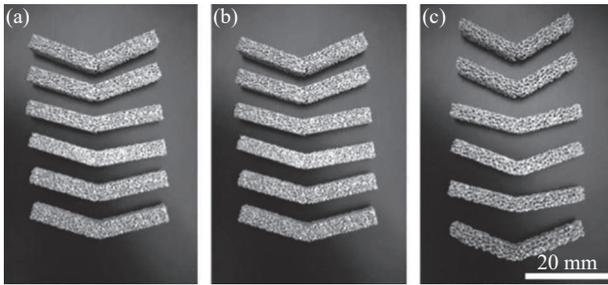


图3 不同孔隙率泡沫钽样品在弯曲测试后的光学照片^[2]。
(a)60.0%; (b)70.0%; (c)80.0%

Fig. 3 Optical photographs of tantalum foam samples after bending testing with different porosities^[2]. (a) 60.0%, (b) 70.0%, (c) 80.0%

表 1 增材制造泡沫钽产品的弯曲强度

Tab. 1 Bending strength of the tantalum foam samples fabricated by additive manufacturing

样品号	1	2	3	平均值
$\theta/\%$	60.0	70.0	80.0	
σ_w -实测值/MPa ^[2]	97.0	52.8	23.0	
σ -式(8)计算值/MPa	101.6	53.5	21.7	
Abs($\Delta\sigma/\sigma_w$)/%	4.8	1.5	5.6	3.9

注:表中 σ_w 表示实测值, σ 表示模型理论计算值, $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_w$ 。

图 3 显示增材制造的网状结构泡沫钽,在弯曲试验中,其孔隙率较高的产品比孔隙率较低的产品表现出更大的延展变形。这也从一个侧面反映了本八面体模型理论关于泡沫金属延伸率的研究结果,即在高孔隙率范围内,孔隙率越高的多孔制品具有更高的延伸率^[12]。由此也间接地验证了本八面体模型理论得出的泡沫金属延伸率关系表征的正确性。

2.1.2 计算和验证

由于该实验材料正好是网状结构^[2],而且其材质又是塑性适中的金属钽,于是可直接应用上述表征一般材质的网状泡沫金属多孔构件的名义弯曲强度关系,即直接粗略地以式(8)进行计算。代入实测数据得出对应拟合材料常数,有:

$$[1 + 0.0875 \times (1 - \theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx 842.89 \times (1 - \theta)^{2.25} \quad (13)$$

将以上对于该泡沫钽的关系式的计算结果一同列于表 1,可见源于本八面体模型理论所得式(13)的计算效果是令人满意的:其计算结果与该产品实测数据的平均偏差不到 4%,为一个在 5% 以内

的小偏差。为便于直观对照,将式(13)的关系曲线与实测数据一同示于图 4,可见理论关系曲线与实测结果表现出较高的吻合度。

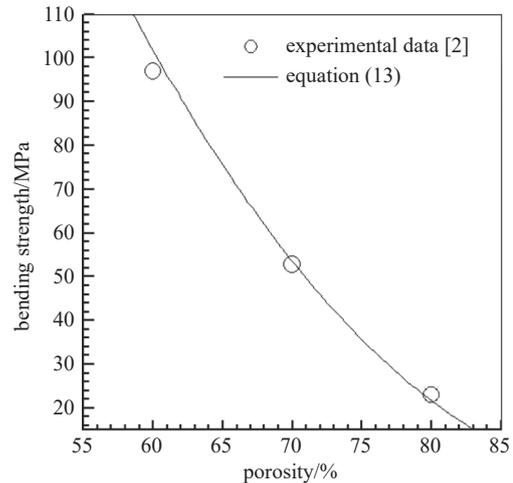


图4 模型理论公式曲线与泡沫钽弯曲强度实测数据的吻合度对照

Fig. 4 Comparison of modeling theoretical relation curve with the test data for bending strength of the tantalum foam sample

2.2 胞孔结构的泡沫铁合金

2.2.1 实验材料

为改善多孔金属制品的机加工性能,研究者研制了一种高孔隙率大孔径的泡沫 Fe 合金^[4]。该多孔制品由松装粉末真空烧结工艺制备,使用碳酸氢铵(NH_4HCO_3)作为成孔剂。在该工作中,样品的弯曲强度是研究者主要关注的一个指标。

多孔样品通过三步法制备,包括粉末混合、装模和烧结等三道工序。首先,Fe 粉和等质量的 Ni-Cr 合金粉与不同量的碳酸氢铵粉末进行混合,目的在于获得最后孔隙率不同的产品。然后将混合粉末装进模具,最后在 1050℃ 真空烧结 30 min。图 5 所示为本烧结样品的典型性孔隙形貌,其孔隙尺寸大于 300 μm ^[4]。

烧结样品的孔隙率通过阿基米德排水法测定,其中开口孔隙的水封方式为样品表面涂覆凡士林。将样品加工成 30 mm × 12 mm × 6 mm (长×宽×高)的尺寸,进行三点弯曲实验。采用底部跨度为 24 mm 的钢固定装置,加载速度为 0.1 mm/min。同一孔隙率水平的样品至少测试 10 个,取测得弯曲强度的平均值,所得相关数据列于表 2。

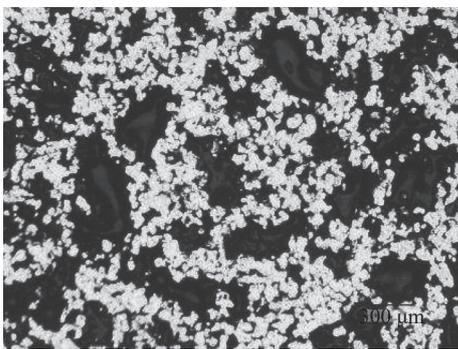
图5 泡沫 Fe 合金样品中的孔隙形貌示例^[4]Fig. 5 Pore morphology examples in porous Fe alloy foam sample^[4]

表 2 松装粉末烧结法制备泡沫 Fe 合金产品的弯曲强度

Tab. 2 Bending strength of the porous Fe-Ni-Cr alloy foam samples fabricated by powder sintering process

样品号	1	2	3	4	平均值
$\theta/\%$	57.5	60.1	64.2	67.7	
σ_w -实测值/MPa ^[4]	69.8	61.4	48.4	36.1	
σ -式(10)计算值/MPa	70.6	60.8	47.2	37.0	
Abs($\Delta\sigma/\sigma_w$)/%	1.1	0.9	2.6	2.6	1.8

注: 表中 σ_w 表示实测值, σ 表示模型理论计算值, $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_w$ 。

2.2.2 计算和验证

由于该实验材料是胞状结构^[4], 而且其材质又是塑性适中的 Fe 合金, 于是可直接应用上述表征一般材质的胞状泡沫金属多孔构件的名义弯曲强度关系, 即以式(12)进行计算。代入实测数据得出对应拟合材料常数, 有:

$$[1 + 0.0875 \times (1 - \theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx 569.13 \times (1 - \theta)^{2.375} \quad (14)$$

将以上对于该泡沫 Fe 合金的关系式的计算结果一同列于表 2, 可见源于本八面体模型理论所得式(14)的计算是相当成功的: 计算结果与该产品实测数据的平均偏差小于 5%, 不到 2%。为便于直观对照, 将式(14)的关系曲线与实测数据一同示于图 6, 可见理论关系曲线与实测结果具有良好的—致性。

2.3 胞孔结构的泡沫钛

2.3.1 实验材料

泡沫钛的力学性能可通过孔隙率等因素的改变而加以调控, 且其多孔结构有利于骨组织长入并形成生物整合^[5]。文献 [5] 采用粉末冶金法研制了一种泡沫钛, 其制备的主要原料为纯度 99.9%、粒度 50 μm 的钛粉, 采用粒度 400~600 μm 的碳酸氢铵

(NH_4HCO_3) 颗粒为造孔剂。将钛粉和造孔剂充分混合后, 由液压机在室温下通过模压法于一定压力下压制生成坯, 然后在氢气保护环境于 1273 K 烧结 3 h, 随炉冷却后即得到泡沫钛试样(图 7)。调节造孔剂使用的质量分数分别为 10%、20%、30% 和 40%, 对应得出孔隙率为 31.0%、44.3%、49.9% 和 55.1% 等 4 个水平的多孔样品, 其孔隙率采用质量-体积法检测。

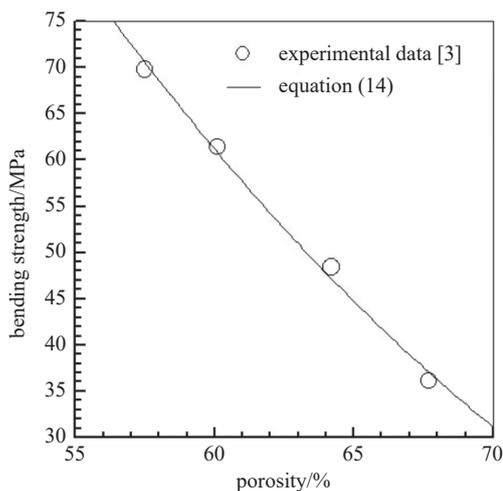
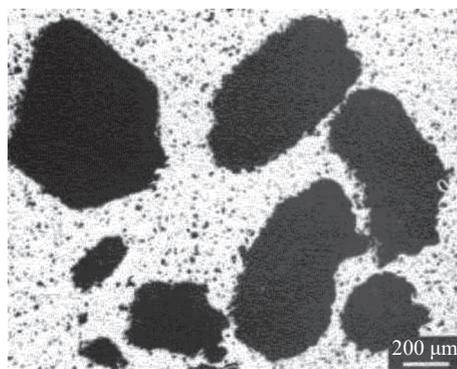


图6 模型理论公式曲线与泡沫 Fe 合金弯曲强度实测数据的吻合度对照

Fig. 6 Comparison of modeling theoretical relation curve with the test data for bending strength of the porous Fe alloy foam sample

图7 一种粉末冶金法所得胞状泡沫钛试样的显微组织结构示例^[5]Fig. 7 Microscopic structure in the cellular titanium foam fabricated by powder metallurgy process^[5]

采用数控线切割法, 将多孔试样加工成尺寸为 $(14 \pm 0.2) \text{mm} \times (5 \pm 0.2) \text{mm} \times (2 \pm 0.2) \text{mm}$ 的长方体^[5]。每个孔隙率水平的试样各为 10 件, 用 SHIMADZU 的电子万能材料试验机进行三点弯曲试验。试样

支承点间距为 10 mm, 加载速率为 0.1 mm/min, 直至试样断裂, 测得的三点弯曲强度值列于表 3。

表 3 粉末冶金法制备胞状泡沫钛的弯曲强度

Tab. 3 Bending strength of titanium foam samples fabricated by powder metallurgy process

样品号	1	2	3	4	平均值
$\theta/\%$	31.0	44.3	49.9	55.1	
σ_{iv} -实测值/MPa ^[5]	271.9	148.4	113.7	83.2	
σ -式(16)计算值/MPa	253.6	149.5	115.1	87.8	
Abs($\Delta\sigma/\sigma_{iv}$)/%	6.7	0.8	1.2	5.5	3.6

注: 表中 σ_{iv} 表示实测值, σ 表示模型理论计算值, $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{iv}$ 。

2.3.2 计算和验证

本实验材料亦为胞孔结构, 仍用上述表征胞状泡沫金属多孔构件的名义弯曲强度关系, 即以式(11)进行计算。因为钛金属材质的脆性很大, 因此将其中的塑性指标(式(4)中的 m)取至上限 1.5, 亦即在式(11)中取“(1- θ)”项的指数上限 2.5, 于是有:

$$[1 + 0.0875 \times (1 - \theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1 - \theta)^{2.5} \quad (15)$$

代入实测数据得出对应拟合材料常数, 得:

$$[1 + 0.0875 \times (1 - \theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx 687.97 \times (1 - \theta)^{2.5} \quad (16)$$

将以上对于该泡沫钛的关系式的计算结果一同列于表 3, 可见源于本八面体模型理论所得式(16)的计算效果也仍然令人满意: 计算结果与该产品实测数据的平均偏差同样小于 5%, 不到 4%。为便于直观对照, 亦将式(16)的关系曲线与实测数据一同示于图 8, 可见理论关系曲线与实测结果也是基本符合的。

3 分析讨论

文中式(3)对应的致密构件弯曲截面模量 W_z 保持一致, 不同试样的弯曲截面模量 W 则随其孔率而变化。根据式(4)的关系, 可得到每个试样的数据点所对应的 M_{MAX} 。如果模型理论足够准确, 式(4)所表达的多孔构件所能承受的最大弯矩 M_{MAX} , 应该与没有测量误差前提下实际测试发生破坏时的弯矩一致。但由于模型理论所得式(4)只是近似关系, 测量误差也无法避免, 因此两者总是会存在一定偏差。

如果指数 m 均取相同的中间值 1.25, 对第 2 部分三个计算例的弯曲强度实验数据分别重新拟合, 则不能得到文中那样计算结果与实验结果的良好吻合。因为在本模型理论中, 指数 m 是对应材质的

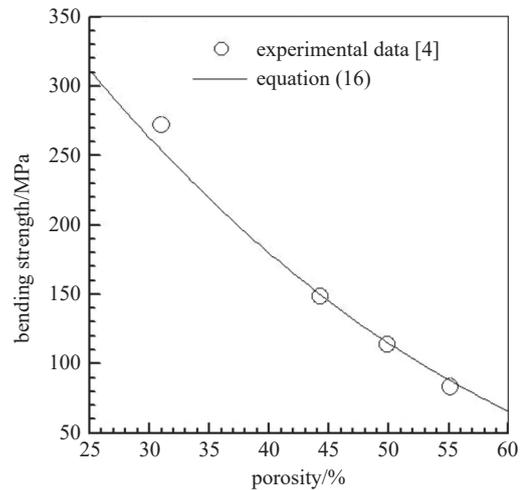


图8 模型理论公式曲线与泡沫钛弯曲强度实测数据的吻合度对照

Fig. 8 Comparison of modeling theoretical relation curve with the test data for bending strength of the titanium foam sample

塑性指标, 要根据具体考察的材料来取值。对于网状多孔产品: 可将塑性适中的材质(如金属镍及其合金、铁合金和钼合金等)对应指数粗略地取 1 和 1.5 的中间值 1.25, 例如文中的泡沫钼制品; 而将脆性较大的材质(如钛合金、钨合金等)对应指数粗略地取 1.25(即 1 和 1.5 的中间值)和 1.5 的中间值 1.375。对于胞状多孔产品: 可将塑性适中的材质对应指数粗略地取 1.25(即 1 和 1.5 的中间值)和 1.5 的中间值 1.375, 例如文中的泡沫铁制品; 而将脆性较大的材质对应指数粗略地取塑性指标的上限 1.5, 例如文中的泡沫钛制品。

若有同样工艺条件制备得到的同材质同种类多孔试样的其他研究者测得的弯曲强度值, 即可用一致的材料常数(或说产品常数) k_B 值, 进行进一步的验证。作者原来也希望有这样的例证, 但一直没有找到。这项工作很有意义, 作者后期还会继续挖掘。

本文作者提出的八面体模型, 可通过较为基本的几何和力学分析方法, 顺推多孔材料的系列基本力学关系^[8-9], 较便捷地用于多孔材料基本力学性能的近似计算。业界至今一直较为普遍地沿用的 Gibson-Ashby 模型为连接式正六面体模型(立方模型), 也可通过同样的基本几何力学方法, 顺推多孔材料的拉伸强度和压缩强度关系公式用于近似计算; 但该模型理论体系的其他基本力学性能关系, 则需在关键环节将多孔体视作连续致密体而借助连续介质

相关关系,才能延续推演来得出^[13]。对于多孔材料的弯曲强度、扭转强度和剪切强度等性能指标, Gibson-Ashby 模型理论没有推得类似的计算公式^[13-14];而本八面体模型理论则连贯顺畅地成功推得这些计算公式,体现了自身独特的优越性^[15]。后来有很多研究者利用的十四面体模型,主要是用于有限元等数值方法进行力学方面的模拟计算,因为这些数值方法需要精细的材料建模,而十四面体模型更接近于一些多孔材料的真实孔隙结构(其该十四面体模型是作为结构模型来使用的,而非像本八面体模型和 Gibson-Ashby 模型那样形成对应的模型理论体系)。但这些数值方法还需较多的材料参量才能获得较好的拟合结果,而其中一些关键参量的检测和获取往往比较困难(有些参量不能从现成的手册中提取,可能需对多孔材料实体进行较烦琐的实际测量,其中有的还难以得到可靠的测量数据),由此为其计算带来不便和困难。对于本文参考文献中的实践材料,限于源文献提供的参量,采用十四面体模型的数值方法或许难以进行有效的对应计算。

4 结论

(1)基于多孔材料八面体模型理论,可对泡沫金属在弯曲载荷作用下的力学强度进行表征如下:

$$[1 + 0.0875 \times (1 - \theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx K_B \cdot (1 - \theta)^{1+m} \cdot [\sigma] \quad (17)$$

亦即

$$[1 + 0.0875 \times (1 - \theta)^{1/2}] \cdot \sigma \approx k_B \cdot (1 - \theta)^{1+m} \quad (18)$$

式中 σ 为多孔体构件在弯曲载荷作用下发生破坏时的弯曲强度,对应于该构件所能承受的最大弯矩 M_{MAX} ,由 M_{MAX} 与其对应致密构件的弯曲截面模量 W_z 计算所得: $\sigma = M_{MAX}/W_z$ (其中 W_z 由与多孔体构件形状和尺寸均相同的致密构件来计算); θ 为多孔制品的孔隙率; K_B 和 k_B 都是对应泡沫金属的材料常数(或产品常数); $[\sigma]$ 为对应致密材质的许用应力;指数项 m 是多孔制品材质对应的塑性指标。

对于网状泡沫金属,其指数项 m 取值范围在 1.0~1.5 之间即“1.25±0.25”:对于脆性大、刚性高的材质,该指数趋向于上限即 1.50;对于韧性大、塑性高的材质,该指数趋向于下限 1.00;对于塑性适中的一般材质,可将该指数粗略地取值为 1.25。

对于胞状泡沫金属,其指数项 m 取值范围为 1.25~1.50 之间即“1.375±0.125”:对于脆性大、刚性高的材质,该指数趋向于上限即 1.50;对于韧性大、

塑性高的材质,该指数趋向于下限 1.25;对于塑性适中的一般材质,可将该指数粗略地取值为 1.375。

(2)经不同材质和不同结构形式的泡沫金属产品在三点弯曲试验中获得的检测数据验证,这些多孔产品(代表例:一种网状结构的泡沫钽、一种胞状结构的泡沫 Fe 合金和一种胞状结构的泡沫钛)的弯曲强度实测结果,与本模型理论对应关系式的计算结果取得了良好的一致。这说明本模型理论的数理表征也较好地反映了多孔材料在弯曲载荷作用下的力学规律,再次证明了本模型理论的可行性和实用性。

参 考 文 献

- [1] Liu P S, Chen G F. Porous Materials: Processing and applications [M]. Boston: Elsevier Science, 2014
- [2] Yang J Z, Jin X, Gao H R, et al. Additive manufacturing of trabecular tantalum scaffolds by laser powder bed fusion: Mechanical property evaluation and porous structure characterization[J]. *Materials Characterization*, 2020, 170: 110694
- [3] Yang S J, Luo H J, Wang L, et al. Effect of core structure on the quasi-static bending behaviors and failure mechanisms of aluminum foam sandwiches at elevated temperatures[J]. *Materials Characterization*, 2024, 208: 113638
- [4] Su H H, Fu Y C, Xu J H, et al. Porous metal bond matrix with high porosity and large pore size fabricated using pore-forming agent[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 416: 279-283
- [5] Ye Q, Shi X Y, Cao S S, et al. Influence of porosity and pore size on mechanical properties cytocompatibility of porous titanium[J]. *Chinese Journal of Dental Materials and Devices*, 2013, 22(1): 7-12 (叶琦, 石新莹, 曹姗姗, 等. 多孔钛孔隙率和孔隙尺寸对其力学性能及细胞相容性的影响 [J]. *口腔材料器械*, 2013, 22(1): 7-12 (in Chinese))
- [6] Wang N Z, Chen X, Li A, et al. Three-point bending performance of a new aluminum foam composite structure[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26: 359-368
- [7] Liu P S. A new model for porous materials[J]. *Chin J Mater Research*, 2006, 20(1): 64-68 (刘培生. 关于多孔材料的新模型 [J]. *材料研究学报*, 2006, 20(1): 64-68 (in Chinese))
- [8] Liu P S, Ma X M. Special review: Property relations based on the octahedral structure model with body-centered cubic mode for porous metal foams[J]. *Materials*

- and Design, 2020, 188: 108413–108470
- [9] Liu P S, Yang C Y, Cheng W. Study on property model for porous materials 3: mathematical deduction[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(8): 59–81 (刘培生, 杨春艳, 程伟. 多孔材料性能模型研究 3: 数理推演[J]. *材料工程*, 2019, 47(8): 59–81 (in Chinese))
- [10] Yang Q C, Zhang M J, Liu P S. Macroscopic fracture behavior of nickel foam under tension[J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2016, 12(1): 110–118
- [11] Liu P S. Tensile fracture behavior of foamed metallic materials[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 384(1-2): 352–354
- [12] Liu P S, Fu C, Li T F. Relationship between elongation and porosity for high porosity metals[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1999, 9(3): 546–552
- [13] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [14] Ashby M F, Evans A, Fleck N A, et al. *Metal Foams: A Design Guide*[M]. Boston: Elsevier Science, 2000
- [15] Liu P S. Chapter 3: Porous Materials. in *Materials Science Research Horizon*[M]. New York: Nova Science Publishers, 2007