

引用格式: 刘培生, 顷淮斌, 程伟. 基于八面体模型理论的泡沫金属抗拉强度[J]. 航空材料学报, 2026, 46(10): 136-144.

LIU Peisheng, QING Huaibin, CHENG Wei. Tensile strength of metallic foams based on octahedral model theory[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(10): 136-144.

基于八面体模型理论的泡沫金属抗拉强度

刘培生¹, 顷淮斌^{1,2}, 程 伟^{1*}

(1. 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; 2. 广东省科学院 材料与加工研究所, 广州 510650)

摘要: 基于八面体模型理论对多孔材料拉伸性能表征的初步工作, 对泡沫金属抗拉强度的计算进行研究: 一是将材料形式从网状孔隙结构拓展到胞状孔隙结构; 二是将表征结果与最为认可的 Gibson-Ashby 模型理论进行比较分析。利用所得拉伸性能关系公式, 探讨模型理论在泡沫金属抗拉强度计算中的实践应用。结果表明, 八面体模型理论既适用于网状多孔材料, 也适用于胞状多孔材料。八面体模型理论和 Gibson-Ashby 模型理论的性能关系表征都能较好地应用于计算泡沫金属抗拉强度, 且八面体模型理论的计算效果更好。前者的理论计算偏差多小于 8%; 后者的理论计算偏差多为 10% 左右。Gibson-Ashby 模型理论对网状多孔材料的计算偏差较大, 接近 20%; 对胞状多孔材料的计算偏差较小。

关键词: 多孔材料; 泡沫金属; 抗拉强度; 理论计算

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000144

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000144

中图分类号: TB383; V252

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)10-0136-09

Tensile strength of metallic foams based on octahedral model theory

LIU Peisheng¹, QING Huaibin^{1,2}, CHENG Wei^{1*}

(1. Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Based on the preliminary work on tensile property characterization of porous materials from the octahedral model theory, the characterization of tensile strength for metallic foams is investigated. Firstly, the material form is extended from reticular pore structure to cellular pore structure. Secondly, the characterized results are compared and analyzed against the well-recognized Gibson-Ashby model theory. Using the derived tensile property characterization relationship, the practical application of the model theory in calculating the tensile strength of metallic foams is discussed. The results show that the octahedral model theory is applicable to both reticular porous materials and cellular porous materials. Both the octahedral model theory and the Gibson-Ashby model theory can be well applied to calculate the tensile strength of metallic foams, and the octahedral model theory achieves superior calculation performance. The theoretical calculation deviation for the former is mostly within 8%, while that for the latter is mostly around 10%. The Gibson-Ashby model theory yields a relatively large calculation deviation close to 20% for reticular porous material, whereas its deviation is smaller for cellular porous material.

Key words: porous material; metallic foam; tensile strength; theoretical calculation

多孔材料同时存在固有的功能属性和结构属性^[1-7], 其基本力学性能指标是设计应用的基本要求, 而拉压强度又是其中最为基本的性能。例如, 能源等领域大规模应用的多孔电极基体, 既要作为

电极集流体传导电流, 又要作为活性物质的支撑体承受一定载荷; 应用于生物医学领域的多孔结构人工骨, 既要具有生物相容性接纳生物组织的生长, 又要承受身体运动和体重本身带来的双重负荷。

因此,在高质量材料优化设计和实际应用的场合,都会对强度有一个明确的数值要求。因此,准确表征多孔材料的抗拉强度,具有重要的实际意义。

泡沫金属作为功能-结构一体化多孔材料,很多情况其抗拉强度是关键指标之一^[8]。例如,生物医学工程领域的泡沫金属多孔体人工骨,要求其在满足人骨所需较大孔隙率的同时保持较高力学性能;能源领域将泡沫金属用作电池电极基体,此时抗拉强度不仅是整个电极强度和卷制成品率的重要影响因素,也是电池批量工业化生产的关键因素。力学性能与热、声、电等物理性能有机结合,更为泡沫金属的工程应用开创广阔的前景。多孔材料的抗拉强度等基本力学性能表征,是该材料及其结构研制与应用的重要研究内容,抗拉强度表征为工程材料实际应用提供最基本的理论依据^[9]。

通过检索文献数据库,一些研究团队^[10-13]报道了泡沫金属抗拉强度一系列实测数据。这些研究数据既可应用于作者提出的八面体模型理论^[14]进行计算,又可考察和验证对应性能数理关系表征的可行性和实用性。本工作主要研究泡沫金属抗拉强度的预测计算,探讨八面体模型理论对多孔材料抗拉强度模型表征的实践应用,分析4种实际泡沫金属的抗拉强度计算结果。

1 泡沫金属的结构及抗拉强度数理表征

1.1 泡沫金属的结构

高孔隙率泡沫金属的结构形态^[1,15]分为两种:一种是三维网状结构连续固体(图1(a)),根据这种结构特征可将该泡沫金属称为网状泡沫金属,形成的孔隙相互连通,属于典型的通孔结构;另一种是球形、椭球形或多面体壁面结构连续固体(图1(b)、(c)),这种类似生物细胞集结的三维多孔体称为胞状泡沫金属。在这种多孔体中,孔隙壁面可

以形成封闭孔隙,构成闭孔胞状泡沫金属(图1(b)),孔隙壁面也可以连通,构成通孔(开孔)胞状泡沫金属(图1(c))。由此可见,开孔泡沫金属包含网状泡沫金属和通孔胞状泡沫金属两种;而闭孔泡沫金属只有闭孔胞状泡沫金属一种。孔隙结构介于通孔胞状泡沫金属和闭孔胞状泡沫金属之间的结构,称为半开孔泡沫金属。

1.2 八面体模型理论

基于多孔材料简化结构模型即体心立方结构式八面体模型^[16],建立多孔材料八面体模型理论体系,推演得到多孔材料物理和力学性能的数理关系表征^[12-14]。

1.2.1 网状泡沫金属

网状多孔材料具有内部孔隙相互连通的网孔结构,孔隙由孔棱构成,这类材料属于开孔(开口孔隙)型。基于八面体模型理论^[16],推演得到网状泡沫金属抗拉强度表达式如下^[12-14]:

$$\sigma \approx K(1-\theta)^m[\sigma] = K(1-\theta)^{1.25 \pm 0.25}[\sigma] \quad (1)$$

式中: σ 为泡沫金属的表观抗拉强度; K 为材料常数,其值由多孔材料种类和制备工艺条件决定; θ 为多孔材料的总孔隙率;指数项 m 为对应材料的塑性指标,取值范围为1~1.5,写成 1.25 ± 0.25 的形式^[14]; $[\sigma]$ 为孔棱材料对应的许用应力。对于脆性大、刚性高的材料,指数项 m 趋于1.5;对于韧性好、塑性高的材料,指数项 m 趋于1;对于塑性适中的材料,比如金属镍等,指数项 m 近似取为1.25。因为式(1)是一种估算预测,一般情况下参考金属手册中对应或相近材料的断后伸长率、断面收缩率指标,对泡沫金属的塑性指标进行粗略赋值。若手册中有对应或相近材料的断裂韧度、冲击韧性等指标,也可一并作为参考。将材料的许用应力 $[\sigma]$ 和材料常数 K 这两个参量进行整合,得到:

$$\sigma \approx k(1-\theta)^{1.25 \pm 0.25} \quad (2)$$

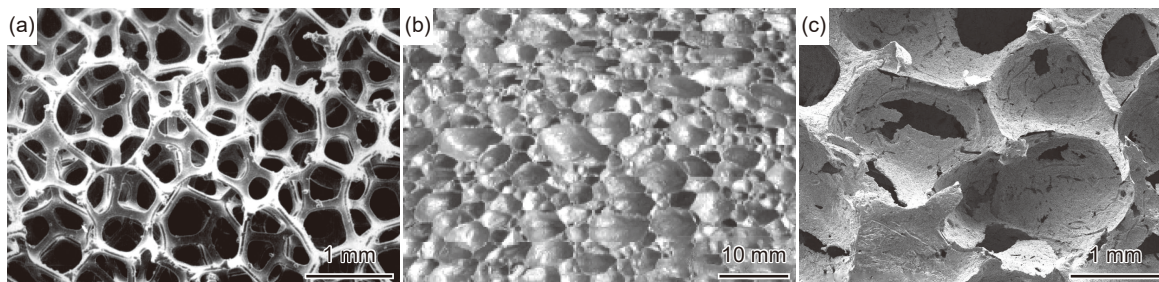


图1 高孔隙率泡沫金属的结构 (a)网状泡沫金属^[1]; (b)闭孔胞状泡沫金属^[15]; (c)通孔胞状泡沫金属^[1]
Fig. 1 Structure of high-porosity metallic foams (a) reticulated metallic foam^[1]; (b) close-cell cellular metallic foam^[15]; (c) open-cell cellular metallic foam^[1]

式中: k 为材料常数, $k=K[\sigma]$ 。对多数塑性适中的泡沫金属, 式(2)可进一步表示为:

$$\sigma \approx k(1-\theta)^{1.25} \quad (3)$$

1.2.2 胞状泡沫金属

胞状泡沫金属可视为网状结构泡沫金属的孔棱向空间延展, 逐渐演变为原孔棱轴线处较厚而远离轴线处较薄直至开口的孔壁。在此情形下, 原孔棱的中性轴距离效应和应力集中效应都将加剧。于是, 当泡沫金属承受外加载荷时, 孔壁最薄处或开口处比原孔棱更易产生裂纹并迅速扩展, 相当于原孔棱材料的脆性提高, 表现为多孔材料的宏观脆性提高^[17-18]。因此, 式(1)中指数项 m 偏向脆性较高, 即取值范围为 1.25~1.5, 写成 1.375 ± 0.125 的形式, 表征胞状泡沫金属的抗拉强度。将胞状泡沫金属的抗拉强度近似作为材料脆性增强的网状泡沫金属来处理, 得到:

$$\sigma \approx k(1-\theta)^{1.375 \pm 0.125} \quad (4)$$

对多数一般材料的胞状泡沫金属, 式(4)表示为:

$$\sigma \approx k(1-\theta)^{1.375} \quad (5)$$

这一表达比较粗略, 但简单且便于应用。

1.3 具有代表意义的经典性模型理论

Gibson 等^[19] 和 Ashby 等^[20] 建立多孔材料的经典性模型理论, 即 Gibson-Ashby(GA)模型理论, 获得多孔材料的性能表征。基于结构模型推演多孔材料的基本力学表征, 结合物理和力学理论, 获得多孔材料的基本物理和力学性能表征。

1.3.1 网状泡沫金属

基于 Gibson-Ashby 模型, 直接推演网状泡沫金属发生塑性坍塌时强度表征, 如式(6)所示^[19]:

$$\sigma/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5} \quad (6)$$

式中: σ 为多孔材料的抗拉强度; σ_{ys} 为对应致密材料的屈服强度; C 为材料常数; ρ 和 ρ_s 分别为多孔材料和相应致密材料的体密度, ρ/ρ_s 为多孔材料的相对密度。主要考虑泡沫塑料等实际多孔材料的大量实验数据, 式(6)的指数项可采用更一般的形式^[20]:

$$\sigma/\sigma_{ys} \approx C(\rho/\rho_s)^m \quad (7)$$

式中: m 为指数项。对于泡沫金属, m 为 1.5~2, 因此表示为式(8):

$$\sigma/\sigma_{ys} \approx C(\rho/\rho_s)^{1.75 \pm 0.25} \quad (8)$$

经过总结更多材料的性能关系, 最后由 Gibson-

Ashby 模型理论给出网状结构泡沫金属抗拉强度表达式, 表示为^[20]:

$$\sigma \approx C_1 \sigma_{bc} = C_1 C_2 \sigma_{cs} (\rho/\rho_s)^{1.5} \quad (9)$$

式中: C_1 和 C_2 均为材料常数; σ_{bc} 为泡沫金属的压缩强度, σ_{cs} 为相应致密材料的压缩屈服强度或压缩强度。考虑到多孔材料的孔隙率 θ 与相对密度 ρ/ρ_s 关系为:

$$\rho/\rho_s = 1 - \theta \quad (10)$$

式(9)可进一步表示为:

$$\sigma \approx C'(1-\theta)^{1.5} \quad (11)$$

式中: C' 为材料常数, $C' = C_1 C_2 \sigma_{cs}$ 。

由此可见, 八面体模型理论与 GA 模型理论所得泡沫金属抗拉强度的根本不同之处在于指数项取值。两者指数项都存在取 1.5 的极限情况, 但取值范围无交集, 对于八面体模型理论, 这个 1.5 为上限, 对于 GA 模型理论, 它为下限, 这会为计算结果带来差异^[21-22]。

1.3.2 胞状泡沫金属

Gibson-Ashby 模型理论给出的胞状泡沫金属抗拉强度表示为^[20]:

$$\sigma \approx c_1 \sigma_{bc} = c_1 c_2 \sigma_{cs} [0.5(\rho/\rho_s)^{1.5} + 0.3(\rho/\rho_s)] \quad (12)$$

式中: c_1 和 c_2 均为材料常数。考虑到多孔材料的孔隙率与相对密度关系(式(10)), 式(12)可进一步表示为:

$$\sigma \approx c [0.5(1-\theta)^{1.5} + 0.3(1-\theta)] \quad (13)$$

式中: c 为材料常数, $c = c_1 c_2 \sigma_{cs}$ 。

2 模型理论的实践应用

2.1 网状泡沫镍

本工作采用企业生产制备的泡沫镍进行测试和实验, 对八面体模型理论中泡沫金属抗拉强度的计算关系进行初步应用和验证。泡沫金属镍为网状孔隙结构(图 1(a)), 由金属镍电沉积工艺制备, 已广泛用于多孔电极基体材料^[1]。采用聚氨酯泡沫塑料为基体, 碳基导电胶进行导电化处理, 普通电镀工艺进行电镀处理。在 850~980 °C 氮分解的还原性气氛中烧结 40 min, 最终得到厚度 2~3 mm 泡沫镍板, 呈三维网状结构。改变电镀时间得到不同孔隙率的多孔材料, 电镀时间越长, 材料孔隙率越低, 对应的孔隙尺寸越小。制备得到泡沫镍试样的孔隙率为 88%~99%, 分为 10 级; 不同孔隙率试

样的孔隙平均尺寸为 0.5~0.8 mm。

将泡沫镍板切割成哑铃状试件, 颈部尺寸为 46 mm×10 mm。采用 XLL-50 型拉力试验机, 加载误差不超过 1%。试样起始夹持位置距离为 8 cm, 夹头垫橡胶垫, 拉伸速率为 8.2 mm/min, 在室温下进行测试。测试过程中根据实际拉力的变化不断调整量程范围, 使试样拉断力既在量程之内又尽可能逼近量程上限, 以减小测量误差。试样在颈部之外区域断裂为无效, 每种孔隙率的试样各测试 4 件。拉伸测试结果表明, 相同孔隙率的 4 个试样测试值分散性较小, 取相同孔隙率 4 件试样的平均测试值, 作为抗拉强度测试值 σ_{tv} , 其结果^[12]见表 1。金属镍及其合金是塑性适中的材料^[17], 因此直接采用八面体模型理论中的式(3), 计算该模型网状泡沫金属抗拉强度; 作为对比, 采用 Gibson-Ashby 模型理论中的式(11)计算该模型网状泡沫金属抗拉强度。分别代入实测数据得出对应拟合材料常数, 两种模型理论公式分别表示为:

$$\begin{cases} \text{Octahedral model: } \sigma \approx 107.03(1-\theta)^{1.25} \\ \text{GA model: } \sigma \approx 234.32(1-\theta)^{1.5} \end{cases} \quad (14)$$

上述对应关系式的计算结果如表 1 所示。计算偏差 A 定义为:

$$A = |\sigma - \sigma_{tv}| / \sigma_{tv} \times 100\% \quad (15)$$

由此可见, 八面体模型理论的计算结果与该材料实测数据一致性较好, 平均计算偏差为 5.5%; Gibson-Ashby 模型理论的计算结果与实测数据偏差较大, 平均计算偏差为 19.9%, 未超过 20%, 在计

算精度要求不高的情况可以采用。

值得注意的是, 由于获取试样的结构参数限制, 未能获得更大孔隙率的试样, 本工作研究孔隙率为 88.60%~98.84% 的泡沫镍。表 1 中泡沫镍试样 6 的计算偏差为 16.6%, 远大于其他试样, 这可能由于大块材料取样不均匀性、试样结构参量的测量误差、拉伸性能测试的测量误差等因素造成。该试样的抗拉强度测试结果, 对于八面体模型理论可判定为可疑的异常数据, 在计算中予以舍弃; 对于 GA 模型理论则要保留。因此本工作保留这一实测数据进行计算。

为便于直观对比, 泡沫镍的抗拉强度实测数据^[12]与计算结果绘制成图 2, 可见八面体模型理论计算与实测结果相符较好, 而 GA 模型理论计算与实测结果偏离略大。考虑到模型中指数取值性质, 这也说明泡沫金属镍是具有中度塑性的材料。

2.2 胞状泡沫铝

通过加入 SiC 颗粒, 研制具有胞状孔隙结构的增强型泡沫铝^[10]。该多孔材料采用直接发泡工艺制备, 以 TiH_2 粉为发泡剂, 材料成分为 SiC 颗粒增强铝基复合体。首先, 通过搅拌铸造法制备 SiC 颗粒增强铝基复合材料铸锭。将铸锭放到坩锅中加热熔化, 熔体在 620~650 °C 下保温, 同时使 SiC 颗粒均匀分布其中。加入 0.5%~1.5% (质量分数, 下同) TiH_2 发泡剂并搅拌, 使其均匀弥散分布于复合熔体中; 搅拌后随炉冷却, 发泡过程在坩锅中进行。在制备过程中, SiC 颗粒用量体积分数分别为 15% 和 20%^[10]。为方便描述, 以下对这两种泡沫铝试样分别标记为

表 1 网状泡沫镍的抗拉强度测试^[12]及计算结果
Table 1 Test^[12] and calculated results of the tensile strength of reticulated nickel foam

Sample number	$\theta/\%$ ^[12]	σ_{tv}/MPa ^[12]	Octahedral model		GA model	
			σ/MPa	$A/\%$	σ/MPa	$A/\%$
1	88.60	6.75	6.91	2.3	9.02	33.6
2	89.66	6.45	6.12	5.2	7.79	20.8
3	90.19	5.40	5.73	6.0	7.20	33.3
4	92.55	4.16	4.06	2.4	4.76	14.5
5	93.52	3.23	3.41	5.6	3.86	19.7
6	95.79	2.48	1.98	16.6	2.02	18.4
7	95.83	2.00	1.97	1.7	2.00	0.2
8	97.15	1.28	1.22	4.6	1.13	11.9
9	98.38	0.63	0.60	4.0	0.48	23.3
10	98.84	0.38	0.40	4.5	0.29	23.0

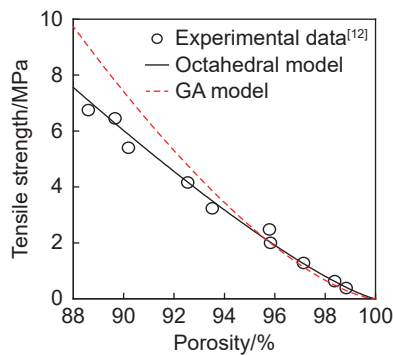


图2 网状泡沫镍的抗拉强度实测^[12]与计算结果对比
Fig. 2 Comparison between test^[12] and calculated tensile strength of reticulated nickel foam

“增强型泡沫铝1”和“增强型泡沫铝2”。

采用线切割切取尺寸为12 mm×12 mm×80 mm的泡沫铝拉伸试样,在MTS万能试验机上进行拉伸性能测试。增强型泡沫铝1和增强型泡沫铝2这两种试样的孔隙率和抗拉强度测试结果^[10]如表2所示。对于该增强型胞状泡沫铝抗拉强度的计算,直接采用八面体模型理论中的式(5);作为对比,采用Gibson-Ashby模型理论中的式(13)计算该材料抗拉强度。分别代入实测数据得出对应拟合材料常数,对增强型泡沫铝1,两种模型理论公式分别表示为:

$$\begin{cases} \text{Octahedral model: } \sigma \approx 33.38(1-\theta)^{1.375} \\ \text{GA model: } \sigma \approx 36.28[0.5(1-\theta)^{1.5} + 0.3(1-\theta)] \end{cases} \quad (16)$$

对增强型泡沫铝2,两种模型理论公式分别表示为:

$$\begin{cases} \text{Octahedral model: } \sigma \approx 36.20(1-\theta)^{1.375} \\ \text{GA model: } \sigma \approx 39.39[0.5(1-\theta)^{1.5} + 0.3(1-\theta)] \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)、(17)中材料常数可知,增强型泡沫铝2的材料常数相应地大于增强型泡沫铝1。这说明对于同样孔隙率的材料,增强型泡沫铝2的抗拉强度总是大于增强型泡沫铝1,该结果与增强型泡沫铝2中含有较多SiC增强相有关。

计算结果如表2所示,从计算偏差可以看出,八面体模型理论与Gibson-Ashby模型理论的计算结果与实测数据偏差相当,其中八面体模型理论的计算偏差波动范围略小:对于增强型泡沫铝1,两种模型计算结果与实测值的平均计算偏差分别为8.3%和8.0%;对于增强型泡沫铝2,两种模型计算结果与实测值的平均计算偏差分别为10.7%和11.6%。总的来说,两种模型理论对强度实测值的平均计算偏差均在10%左右或更小,可见这两种模型均具有良好的实用效果。

值得注意的是,孔隙率为82%的泡沫铝试样孔隙尺寸为4.5 mm,其他试样的孔隙尺寸均为2.5 mm。这对于12 mm×12 mm×80 mm的拉伸试样而言,存在一定程度的尺寸效应。研究表明,测试试样尺寸在3个维度都是孔隙尺寸的7倍以上,这种尺寸效应才可以忽略^[19-20]。但是,由于没有足够大尺寸的拉伸测试试样作为比较,难以考量尺寸效应对拟合精确度的具体影响,只能将其计入计算偏差之内。

为便于直观对比,增强型泡沫铝1和增强型泡沫铝2的抗拉强度实测数据^[10]与计算结果绘制成图3。由此可见,对于两种增强型泡沫铝,两种模型理论的计算结果均与实测值大致相符,其中八面体模型理论计算结果与实测值符合更好。

2.3 胞状泡沫6061铝合金

以蜡粉为发泡剂,通过粉末冶金的方法制备泡

表2 两种增强型胞状泡沫铝的抗拉强度测试^[10]及计算结果
Table 2 Test^[10] and calculated results of the tensile strength of two reinforced aluminum foams

Type	Sample number	$\theta/\%$ ^[10]	σ_{tv}/MPa ^[10]	Octahedral model		GA model	
				σ/MPa	$A/\%$	σ/MPa	$A/\%$
Reinforced aluminum foam 1	1	82	3.36	3.15	6.0	3.34	0.5
	2	75	4.23	4.96	17.2	4.99	17.9
	3	70	6.99	6.38	8.8	6.25	10.6
	4	65	7.78	7.88	1.3	7.56	2.8
Reinforced aluminum foam 2	5	82	3.58	3.43	4.3	3.63	1.4
	6	75	4.32	5.38	24.5	5.42	25.4
	7	70	7.47	6.91	7.4	6.78	9.2
	8	65	9.16	8.55	6.7	8.21	10.3

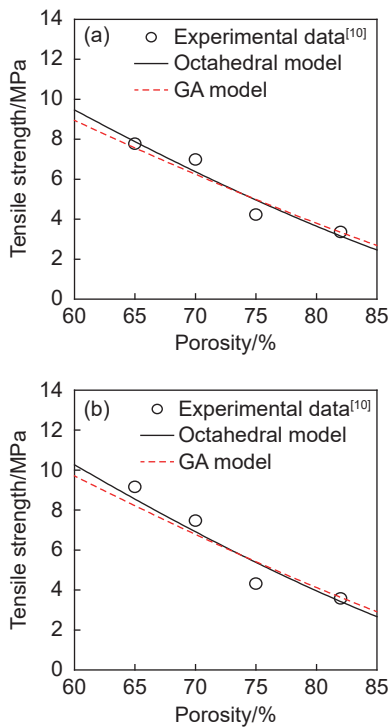


图 3 增强型胞状泡沫铝 1(a)和增强型胞状泡沫铝 2(b)的抗拉强度实测^[10]与计算结果对比

Fig. 3 Comparison between test^[10] and calculated tensile strength of reinforced cellular aluminum foam 1 (a) and reinforced cellular aluminum foam 2 (b)

沫 6061 铝合金^[23]。选择 AA 6061 铝合金粉作为基体成分,与蜡质发泡剂有效混合,采用冷压方式用模具压实在一起。将试样置于电炉中在 400 ℃下烧结 30 min,使用不同用量的发泡剂获得不同孔隙率的泡沫铝合金。

泡沫 6061 铝合金拉伸试样尺寸为 200 mm×25 mm×12.5 mm,30 ℃下以 2 mm/min 的速率在万能试验机进行抗拉强度测试,测试结果^[23]如表 3 所示。该多孔材料是胞状结构,且 6061 铝合金塑性适中^[23]。因此,对于该泡沫铝合金的抗拉强度计算,八面体模型理论可直接采用式(5)。作为对比,Gibson-Ashby 模型理论公式采用式(13)进行计算。分别代入实测数据得出拟合材料常数,对于泡沫 6061 铝合金,两种模型理论分别

表示为:

$$\begin{cases} \text{Octahedral model: } \sigma \approx 22.88(1-\theta)^{1.375} \\ \text{GA model: } \sigma \approx 25.43[0.5(1-\theta)^{1.5} + 0.3(1-\theta)] \end{cases} \quad (18)$$

计算结果如表 3 所示,八面体模型理论计算结果略优于 GA 模型理论,最大偏差分别为 9.9% 和 10.8%,平均计算偏差分别为 6.2% 和 6.7%,可见八面体模型理论的两项指标均较小。总的来说,两种模型理论对抗拉强度实测值的平均计算偏差均小于 10%,表现出良好的应用效果。

为便于直观对比,将泡沫 6061 铝合金的抗拉强度测试^[24]与计算结果绘制成图 4。由此可见,两种模型理论的计算结果均与实测结果大致相同,其中八面体模型理论计算结果与实测结果更相符。

2.4 胞状泡沫不锈钢

粉末冶金是以金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)作为原料,经成形和烧结制成多孔金属材料、复合材料等的工艺^[1,24]。粉末冶金制备多孔金属材料的工艺过程包括金属粉末制备、多孔体成形及多孔体烧结 3 大步骤^[8]。为了增加材料孔隙率,在粉体中加入可热分解的造孔剂,造孔剂在高温烧结或高温烧结前期的热处理过程中得以去除并形成较大孔隙。文献[11]报道一种采用粉末冶金制备的胞状泡沫不锈钢,其组成成分质量分数为:Cr: 16.92%, Mn: 10.16%, Mo: 3.25%, Ni: 0.48%, C: 0.052%, N: 0.42%, O: 0.13%, Fe: 余量。采用氮气雾化法制备平均粒径为 14 μm 的球形含氮双相不锈钢粉末,加入 10%~50% 碳酸氢铵作为造孔剂。在 V 型混粉机中对原始粉末均匀混合后,经油压机冷压成形。试样先在 220 ℃下预烧结以去除造孔剂,然后在氮气保护下 1150 ℃高温烧结 2 h,随炉冷却至室温。

采用 MTS Test Star 810 型万能试验机对泡沫不锈钢试样进行拉伸性能测试,拉伸速率为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。泡沫不锈钢的孔隙率和抗拉强度测试结果^[11]如表 4 所示。对于该胞状结构泡沫不锈钢的抗拉强度计算,直接采用八面体模型理论中的式

表 3 泡沫 6061 铝合金的抗拉强度测试^[23]及计算结果
Table 3 Test^[23] and calculated results of the tensile strength of 6061 aluminum alloy foam

Sample number	$\theta/\%$ ^[24]	$\sigma_{\text{tv}}/\text{MPa}$ ^[24]	Octahedral model		GA model	
			σ/MPa	$A/\%$	σ/MPa	$A/\%$
1	67.32	5.17	4.92	4.9	4.87	5.8
2	70.27	4.48	4.32	3.7	4.33	3.4
3	71.31	3.74	4.11	9.9	4.14	10.8

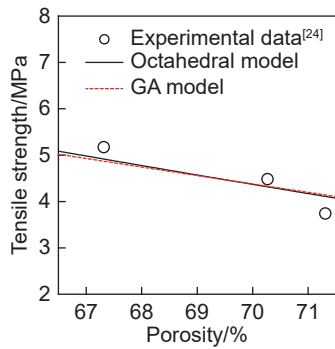


图4 胞状泡沫6061铝合金的抗拉强度实测^[23]与计算结果对比

Fig. 4 Comparison between test^[23] and calculated tensile strength of cellular 6061 aluminum alloy foam

(5); 作为对比, 采用 Gibson-Ashby 模型理论中的式(13)计算该材料抗拉强度。分别代入实测数据得出对应拟合材料常数, 对于泡沫不锈钢, 两种模型理论公式分别表示为:

$$\begin{cases} \text{Octahedral model: } \sigma \approx 1021.32(1-\theta)^{1.375} \\ \text{GA model: } \sigma \approx 1230.63[0.5(1-\theta)^{1.5} + 0.3(1-\theta)] \end{cases} \quad (19)$$

计算结果如表4所示, 八面体模型理论与 Gibson-Ashby 模型理论的平均计算偏差分别为 7.4% 和 8.2%, 这两种模型均达到良好的应用效果。

表4 泡沫不锈钢的抗拉强度测试^[11]及计算结果
Table 4 Test^[11] and calculated results of the tensile strength of stainless steel foam

Sample number	$\theta/\%$ ^[11]	$\sigma_{\text{tv}}/\text{MPa}$ ^[11]	Octahedral model		GA model	
			σ/MPa	$A/\%$	σ/MPa	$A/\%$
1	26.8	712.0	665.1	6.6	655.6	7.9
2	35.2	582.0	562.4	3.4	560.2	3.7
3	40.6	516.0	499.0	3.3	501.0	2.9
4	48.6	352.0	409.0	16.2	416.5	18.3

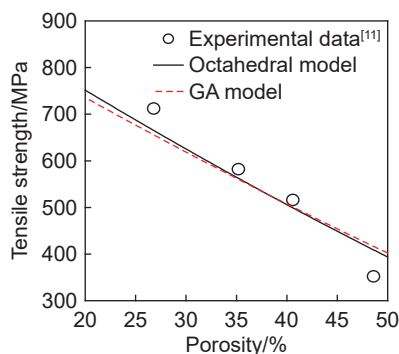


图5 胞状泡沫不锈钢的抗拉强度实测^[11]与计算结果对比

Fig. 5 Comparison between test^[11] and calculated tensile strength of cellular stainless steel foam

为便于直观对比, 将泡沫不锈钢的抗拉强度实测数据^[11]与计算结果绘制成图5。由此可见, 两种模型理论的计算结果均与实测值大致相符, 其中八面体模型理论计算结果与实测值更相符。

对于多孔材料的力学性能, 除材料本身外, 孔隙率是最重要的影响因素^[12-14, 19-20]。孔隙形貌和分布(即孔隙均匀性)等其他因素也会影响多孔材料的力学性能, 但是影响程度远小于孔隙率^[25]。由于其他因素在公式中不易直接加以具体表述, 且考虑到它们取决于制备工艺, 因此本工作理论公式将其他因素产生的影响通过表征材料种类和制备工艺的材料常数体现, 已有实验结果证明这种方式是可行的^[12]。

尽管研究人员对高孔隙率多孔材料提出很多结构模型^[16, 19, 26], 比如 Kelvin 提出的十四面体结构模型(Kelvin 模型)、三棱柱结构模型、四棱柱结构模型、六棱柱结构模型、菱形十二面体模型等, 以及作者提出的八面体结构模型和本工作采用的 GA 模型, 但其中只有八面体模型和 GA 模型, 能够通过隔离孔棱的简单方式进行力学分析, 从而便捷地推演得出高孔隙率泡沫金属的抗拉强度表达式。实际上, 目前未发现其他模型理论的此类应用报道。因此, 暂难以将本工作研究结论与已有研究进行引证和对比。

3 结论

(1) 基于网状多孔材料的八面体模型理论力学关系, 可推广到胞状泡沫金属产品的表征, 其主要差异为塑性指标。胞状泡沫金属抗拉强度可表达为:

$$\sigma \approx k(1-\theta)^{1.375 \pm 0.125}$$

(2) 经不同泡沫金属材料的拉伸性能测试数据验证, 泡沫金属的抗拉强度实测结果, 与八面体模型理论和 Gibson-Ashby 模型理论的计算结果均取得良好的一致性, 且八面体模型理论的计算效果更

好。这说明八面体模型理论能够较好地反映多孔材料在拉伸载荷作用下的力学行为,该模型理论具有可行性和实用性。

参考文献:

- [1] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Liu P S. Introduction to porous materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [2] García-Moreno F. Commercial applications of metal foams: their properties and production[J]. *Materials*, 2016, 9(2): 85.
- [3] Cheng Y, Li Y X, Chen X, et al. Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with a wide range of relative densities[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(8): 4016-4024.
- [4] Atwater M A, Guevara L N, Darling K A, et al. Solid state porous metal production: a review of the capabilities, characteristics, and challenges[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(7): 1700766.
- [5] Wang L, Luo H J, Yang S J, et al. Compressive behavior and energy absorption analysis of casting skin-wrapped aluminum foams[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 36: 106839.
- [6] 薛新, 葛绍祥, 魏雨函, 等. 基于分形理论的多孔材料设计及表征研究进展[J]. *材料工程*, 2026, 54(5): 200-212.
Xue X, Ge S X, Wei Y H, et al. Research progress in design and characterization of porous materials based on fractal theory[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2026, 54(5): 200-212.
- [7] 戴志伟, 吴亚东, 朱伟健, 等. 制备工艺对多孔 Ti6Al4V 微观结构和性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(6): 36-43.
Dai Z W, Wu Y D, Zhu W J, et al. Effects of preparation process on microstructure and properties of porous Ti6Al4V[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(6): 36-43.
- [8] 刘培生, 梅乐夫, 程伟. 多孔材料基础与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
Liu P S, Mei L F, Cheng W. Fundamentals and applications of porous materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2024.
- [9] 苏淑兰, 饶秋华, 贺跃辉. 新型 Ti-Al 金属间化合物多孔材料的弹性模量表征[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2012, 17(6): 804-809.
Su S L, Rao Q H, He Y H. Elastic modulus characterization of Ti-Al intermetallic porous material[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2012, 17(6): 804-809.
- [10] 桂满昌, 吴洁君, 袁广江, 等. 泡沫 SiC 颗粒增强铝基复合材料的制备工艺和拉伸强度[J]. *材料工程*, 2001(1): 26-27.
Gui M C, Wu J J, Yuan G J, et al. Fabrication processing and tensile strength of foam of Al/SiC_p composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2001(1): 26-27.
- [11] 牛萍萍, 刘瑛, 曹萍. 粉末冶金制备建筑用多孔不锈钢组织和性能分析[J]. *粉末冶金工业*, 2020, 30(3): 64-67.
Niu P P, Liu Y, Cao P. Microstructure and properties analysis of porous stainless steel for building by powder metallurgy[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2020, 30(3): 64-67.
- [12] 刘培生, 夏凤金, 程伟. 多孔材料性能模型研究 2: 实验验证[J]. *材料工程*, 2019, 47(7): 35-49.
Liu P S, Xia F J, Cheng W. Study on property model for porous materials 2: experimental verification[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(7): 35-49.
- [13] 刘培生, 程瑜扬, 程伟, 等. 泡沫镍/树脂多孔复合材料的压缩强度和比强度[J]. *材料工程*, 2025, 53(3): 153-158.
Liu P S, Cheng Y Y, Cheng W, et al. Compressive strength and specific strength of porous nickel foam/resin composite material[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(3): 153-158.
- [14] 刘培生, 崔光, 程伟. 多孔材料性能模型研究 1: 数理关系[J]. *材料工程*, 2019, 47(6): 42-62.
Liu P S, Cui G, Cheng W. Study on property model for porous materials 1: mathematical relations[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(6): 42-62.
- [15] 刘红, 解茂昭, 李科, 等. 吹气发泡法制备闭孔泡沫铝发泡过程的三维数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2007, 7(5): 889-894.
Liu H, Xie M Z, Li K, et al. Numerical simulation of production process of aluminum foam by air injecting and melt stirring[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2007, 7(5): 889-894.
- [16] 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.
Liu P S. A new model for porous materials[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2006, 20(1): 64-68.
- [17] 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.
- [18] Liu P S. Tensile fracture behavior of foamed metallic materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 384(1/2): 352-354.
- [19] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: structure and

- properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [20] Ashby M F, Evans A, Fleck N A, et al. Metal foams: a design guide[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [21] 刘培生, 梁开明, 顾守仁, 等. 多孔金属抗拉强度公式中的指数项取值[J]. *力学学报*, 2001, 33(6): 853-855.
Liu P S, Liang K M, Gu S R, et al. The exponential item in formulas for calculating tensile strength of porous metal[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2001, 33(6): 853-855.
- [22] 刘培生, 黄林国, 梁开明, 等. 关于三维网状高孔率材料抗拉强度公式中指数项的讨论[J]. *稀有金属*, 2002, 26(3): 194-197.
Liu P S, Huang L G, Liang K M, et al. Exponential term in formula evaluating tensile strength for porous materials with 3-D reticulated structure[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2002, 26(3): 194-197.
- [23] Madgule M, Sreenivasa C G, Borgaonkar A V, et al. Effect of influencing parameters on developing aluminum metal foam by using powder metallurgy technique with a foaming agent as a wax powder[J]. *Journal of Porous Materials*, 2023, 30: 1021-1036.
- [24] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
Huang P Y. Theory of powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2004.
- [25] 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(2): 359-368.
- [26] Liu P S. Chapter 3 porous materials[M]// Materials Science Research Horizon. New York: Nova Science Publisher, 2007.

收稿日期: 2024-09-21; 录用日期: 2025-01-08

基金项目: 北京师范大学测试基金项目(C24)

通讯作者: 程伟(1973—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为材料计算, 联系地址: 北京师范大学物理与天文学院(100875), E-mail: chengwei@bnu.edu.cn

(本文责编: 陈 卉)