

多孔 CoCrNi 中熵合金的力学性能和吸能特性分析

贾桥瑞¹, 王晓花², 刘杰², 马胜国¹, 王志华¹

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 太原理工大学 航空航天学院, 山西 太原 030024)

摘要: 采用粉末烧结-溶解法成功制备了孔隙率为 63%~78%, 孔径 1.3~2.2 mm 的多孔 CoCrNi 中熵合金, 借助 SEM 和 XRD 对试样的孔形貌和物相组成进行分析, 并对试样进行轴向准静态压缩实验研究。结果表明: 多孔 CoCrNi 中熵合金的弹性模量和屈服平台应力均随孔隙率、孔径的增大而减小; 相对孔隙率而言, 孔径对力学性能的影响程度较低; 不同孔隙率的多孔 CoCrNi 中熵合金其致密应变下单位体积的能量吸收值为 34.81~14.25 MJ/m³, 约为泡沫铝的 3.8 倍, 且 5 种孔隙率合金的理想吸能效率 (I) 都接近 0.8, 说明该多孔 CoCrNi 中熵合金有潜力成为一种理想的吸能材料。

关键词: 多孔中熵合金; 粉末冶金; CaCl₂; 力学性能; 吸能特性

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)04-1149-06

多孔金属材料作为一种新型的结构功能一体化材料, 不仅具有轻质、高比强度等特点, 还具有缓冲吸能、隔音和散热等功能特性, 因此, 在航空航天和交通运输等领域得到了广泛的应用^[1-5], 如美国在 AMS-02 号卫星防护 TRD 核心部件上使用了泡沫铝作为缓冲吸能材料^[6]。目前, 应用在缓冲吸能领域的多孔金属材料主要是泡沫铝, 当孔隙率为 50%~70% 时, 其吸能范围是 12.23~7.39 MJ/m³^[7]。但是, 随着人们对安全性提出了更高的要求, 泡沫铝的强度和吸能特性已经不能满足市场需要, 因此, 我们需要开发具有更好力学性能和吸能特性的多孔金属材料。

多孔金属的力学性能与其基体金属的性能有直接关系。近年来, 多主元合金因其等原子比或近等原子比混合形成的简单固溶体相或双相结构, 表现出高硬度、高强度、良好的塑性、耐腐蚀性、耐磨性以及优于传统合金的高低温力学性能, 而成为材料和力学学科研究的热点之一^[8-15]。其中 CoCrNi 中熵合金因同时兼具良好的强度和塑性而备受关注^[16]。Weng^[17]等使用激光辅助制造制备了 CoCrNi 中熵合金, 屈服强度达到 620.5 MPa, 延伸率为 44.8%。Moravcik 等^[18]通过放电等离子烧结的粉末冶金工艺成功制备了 CoCrNi 中熵合金, 其屈服强度可达 652 MPa, 极限抗拉强度在 1024 MPa, 延伸率为 25.9%。Sathiaraj 等^[19]研究了退火对冷轧 CrCoNi 中熵合金力学性能的影响, 结果

发现, 退火后可获得超细晶组织, 其具有超高的强度和良好的塑性, 屈服强度可达 964 MPa, 延伸率可达 66%。也有研究人员将多主元合金作为基体金属, 制备并研究多孔高熵合金的结构及性能, Son 等^[20]就采用脱合金法成功制备出了纳米多孔高熵合金, 平均孔径为 24 nm。Xu 等^[21]采用粘结剂喷射技术制备了孔隙率为 35%~40% 的多孔 CoCrFeMnNi 高熵合金, 试样的屈服强度为 42~70 MPa, 抗压弹性模量为 3~12 GPa, 能量吸收值可达 150 MJ/m³。但是, 对于高孔隙率的多孔多主元合金的研究鲜有报道, 因此, 本研究将制备高孔隙率的多孔 CoCrNi 中熵合金。

目前, 对以多主元合金为基体材料的多孔金属制备方法主要有脱合金法和激光自蔓延烧结法。李刚等^[22]使用激光自蔓延烧结后制备出了 CrFeNiAlSiCu_x 的多孔高熵合金。闫飞虹^[23]等采用脱合金法成功制备了三维纳米多孔高熵合金。Lan 等^[24]通过用强硝酸和硝酸铜溶液腐蚀球形高熵合金成功制备了多孔高熵合金, 其具有良好电磁波吸收能力。但是, 这些方法工艺流程长, 成本高, 因此本研究将采用粉末烧结-溶解法制备多孔中熵合金, 与其他方法相比, 粉末烧结-溶解法工艺简单, 孔隙率和孔径可控, 成本低, 成分设计灵活^[25]。本研究使用 CaCl₂ 颗粒为造孔剂, 选用 CoCrNi 中熵合金为基体金属, 采用粉末烧结-溶解法制备高孔隙率的多孔 CoCrNi 中熵合金, 并研究多孔 CoCrNi 中熵合金的力学性能和吸能特性。

收稿日期: 2023-04-23

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (12225207); 国家自然科学基金面上项目 (12072220)

作者简介: 贾桥瑞, 男, 1998 年生, 硕士生, 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: jiaqiaorui0042@link.tyut.edu.cn

1 实 验

实验的原材料为雾化法生产的 CoCrNi 合金粉末 (粒径 45~105 μm), 购自北京研邦新材料科技有限公司, 造孔剂为无水 CaCl_2 (粒径 1.2~2.3 mm), 购自西陇化工股份有限公司, 图 1 为 CoCrNi 合金粉末和 CaCl_2 颗粒的形貌。

首先将 CoCrNi 合金粉末和不同粒径的 CaCl_2 颗粒按照一定比例均匀混合, 造孔剂的体积分数为 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 采用的造孔剂经筛分, 选取的平均粒度分别为 1.4, 1.8, 2.3 mm。混合过程中加入 3%~5% 无水乙醇作为粘结剂。将混合均匀的粉末放入压坯模具中进行轴向压制, 压力为 500 MPa, 保压时间为 5 min, 坯样脱模后放入干燥箱中去除粘结剂, 干燥温度为 110 $^{\circ}\text{C}$, 时间为 2 h。将干燥好的坯样放于高真空烧结炉中进行烧结, 烧结温度为 1250 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 2 h, 坯样随炉冷却后取出, 将其放置于 100 $^{\circ}\text{C}$ 的去离子水中去除 CaCl_2 , 干燥完成后即可得到多孔 CoCrNi 中熵合金。

实验中孔隙率的测定采用质量-体积直接计算法^[26], 孔隙率的计算公式见式 (1):

$$\theta = \left(1 - \frac{m}{V\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

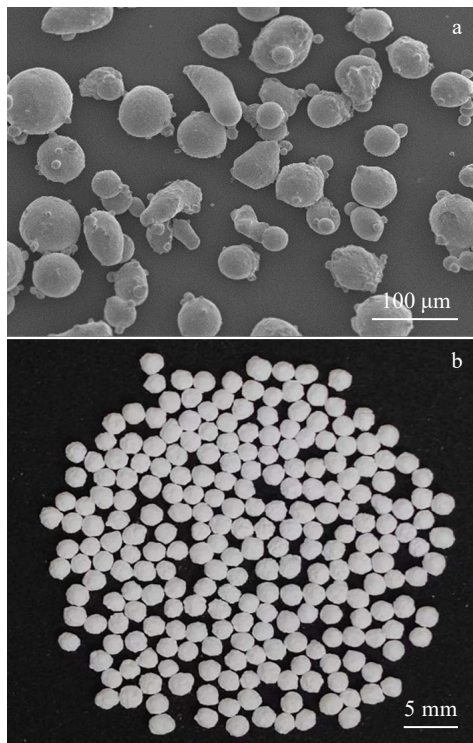


图 1 CoCrNi 合金粉末和 CaCl_2 颗粒的形貌

Fig.1 Morphologies of CoCrNi alloy powder (a) and CaCl_2 particles (b)

式中, m 为试样质量, V 为试样体积, ρ_s 为实体 CoCrNi 中熵合金的实际密度。

用 JSM-7100F 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样的微观形貌; 用日本理学 UltimalV 型 X 射线衍射仪测定试样的物相组成, 扫描范围为 20 $^{\circ}$ ~100 $^{\circ}$; 采用电子万能试验机对试样进行准静态压缩试验, 压缩实验的应变率为 10 $^{-3}$ s $^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 孔形貌及物相分析

图 2a 为不同孔隙率 CoCrNi 中熵合金的宏观形貌, 其中 1 $^{\#}$ 、2 $^{\#}$ 、3 $^{\#}$ 、4 $^{\#}$ 、5 $^{\#}$ 依次为孔隙率 63.21%, 66.31%, 69.89%, 73.86%, 77.66% 的多孔 CoCrNi 中熵合金。由图可知, 多孔 CoCrNi 中熵合金具有三维连通的开孔结构, 孔形貌几乎复制了 CaCl_2 颗粒的形状, 孔形貌为近球形, 孔的分布比较均匀且孔的连通性较好。由图还可以得出, 随着孔隙率的增大, 孔的数量增多, 孔壁变薄, 孔的连通性变大。当孔隙率达到 80.86% 以上时, 孔壁已经薄到无法支撑起整个多孔结构, 从而导致试样坍塌, 因此, 采用粉末烧结-溶解法制备的多孔 CoCrNi 中熵合金的孔隙率不超过 80.86%。

图 2b 和 2c 为多孔 CoCrNi 中熵合金放大不同倍数下孔内和孔壁的 SEM 微观扫描图, 可以发现, 除了去除造孔剂留下的大孔外, 同时观察到孔壁上有球形微孔, 这是 CoCrNi 合金颗粒间隔处的间隙孔。经测量得到该多孔中熵合金的孔径为 1.3~2.2 mm, 平均孔径约为 1.7 mm, 孔壁厚度约为 290 μm 。图 2d 展示了多孔 CoCrNi 试样中烧结颈形貌, 由图可知, 孔隙变得光滑且晶粒显著长大, 说明已经到达了烧结后期, 即在 1250 $^{\circ}\text{C}$ 、保温 2 h 的烧结条件下, CoCrNi 合金颗粒实现了很好的冶金结合。该烧结颈的形成直接影响着烧结体的孔隙率、相对密度以及力学性能。

图 3 为实体 CoCrNi 中熵合金和多孔 CoCrNi 中熵合金的 XRD 图谱。由图可知, 2 种材料均为单相 fcc 固溶体结构, 而且多孔 CoCrNi 中熵合金除了基体的衍射峰以外, 没有其他衍射峰的存在, 说明造孔剂 CaCl_2 已经完全除尽。

2.2 力学行为

将不同孔隙率和不同孔径的多孔 CoCrNi 中熵合金试样进行准静态压缩实验, 得到了如图 4 所示的应力-应变曲线。由图可知, 多孔 CoCrNi 中熵合金的应力-应变曲线明显分为 3 个阶段: 弹性阶段、塑性平台阶段和密实化阶段。弹性阶段的曲线呈现应力随应变线性增加, 当应力达到材料的屈服强度后, 进入塑性

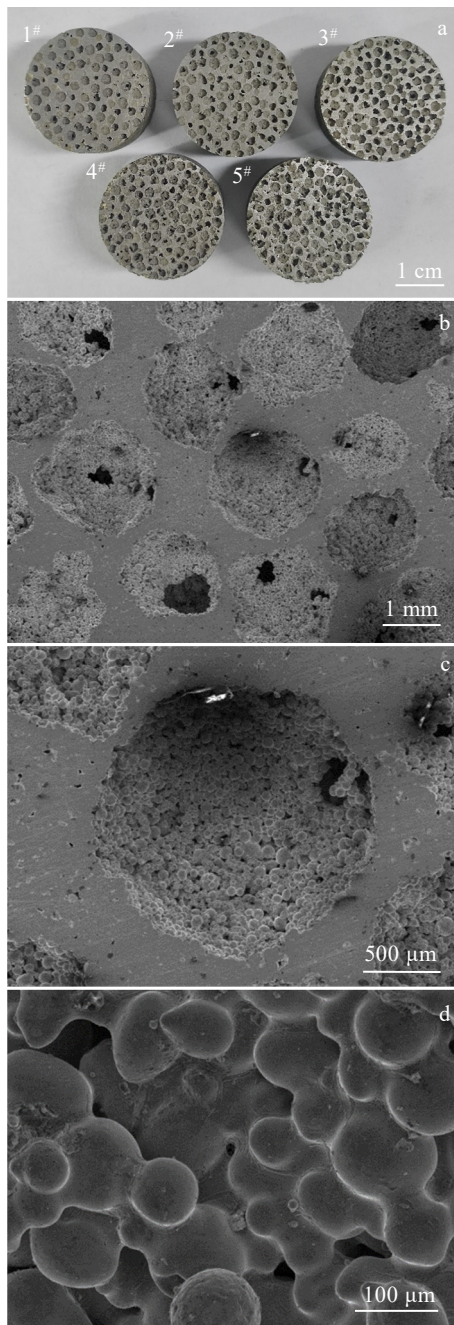


图2 多孔 CoCrNi 中熵合金的孔形貌

Fig.2 Pore morphologies of porous CoCrNi MEA: (a) macro pore; (b) micro pore; (c) single pore; (d) sintered neck

平台阶段, 此阶段应力随着应变缓慢地增大, 当应变达到致密应变后, 进入密实化阶段, 此阶段应力随应变急剧增加。由图还可以得出, 当孔径一定, 随着孔隙率的增大, 材料的塑性模量减小, 应力-应变曲线表现出更加明显的平台, 应力趋于稳定; 而孔径对材料的塑性模量几乎没有影响。

图5为多孔 CoCrNi 中熵合金孔径为 1.7 mm 时,

弹性模量和平台应力与孔隙率的关系。由于平台段平台应力不明显, 因此采用 20%~30% 应变区间的应力平均值作为平台应力^[27]。由图可得, 当孔径一定时, 随着孔隙率的增大, 弹性模量从 2.09 GPa 减小到了 0.42 GPa, 减小了 79.9%; 平台应力从 63.4 MPa 减小到了 19.96 MPa, 减小了 68.5%。这是因为在压缩的过程中, 孔壁承受其载荷的作用, 随着孔隙率的增大, 孔隙增多, 孔壁随之变薄, 孔壁抵抗变形的能力变差, 所以导致弹性模量和平台应力减小。

图6为多孔 CoCrNi 中熵合金孔隙率为 69.89% 时, 力学性能与孔径的关系。由图可知, 当孔隙率一定时,

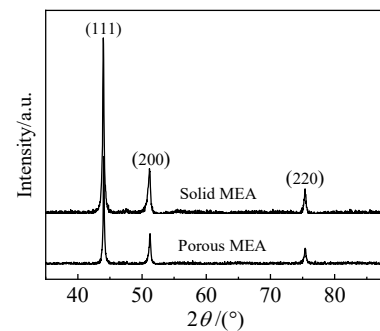


图3 实体 CoCrNi 中熵合金和多孔 CoCrNi 中熵合金的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of solid CoCrNi MEA and porous CoCrNi MEA

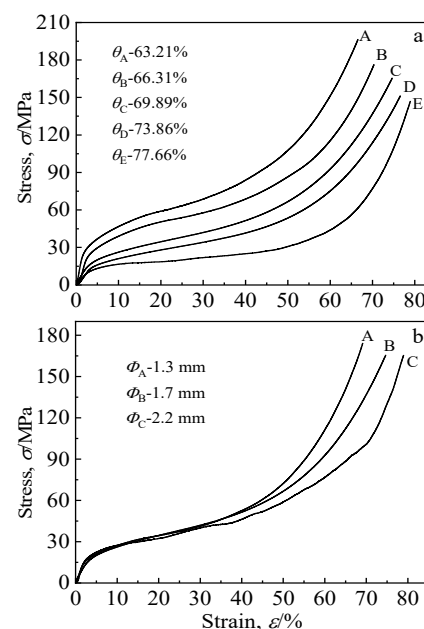


图4 不同孔隙率(孔径 1.7 mm) 及不同孔径(孔隙率 69.89%) 多孔 CoCrNi 中熵合金的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of porous CoCrNi MEA: (a) different porosities (pore size=1.7 mm) and (b) different pore sizes (porosity=69.89%)

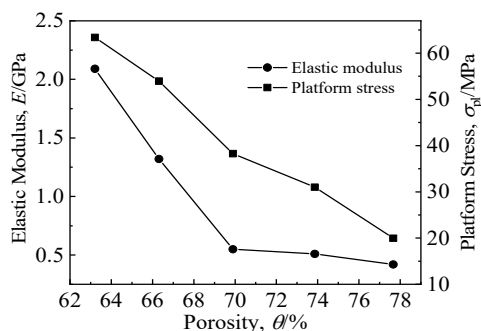


图 5 多孔 CoCrNi 中熵合金的弹性模量和平台应力与孔隙率的关系

Fig.5 Relationship among elastic modulus, platform stress and porosity of porous CoCrNi MEA

随着孔径的增大, 弹性模量从 0.8 GPa 减小到了 0.5 GPa, 减小了 37.5%; 平台应力从 38.97 MPa 减小到了 36.15 MPa, 下降了 7.23%。这是因为随着孔径的增大, 材料更容易出现应力集中, 抵抗变形的能力变差, 从而导致弹性模量和平台应力减小。同时, 比较后发现, 孔隙率对弹性模量和平台应力的影响比孔径的影响程度更大, 这与已有的研究结果一致^[28]。

2.3 能量吸收性能

泡沫材料作为吸能材料最重要的特性就是要有较好的能量吸收值, 能量吸收值可表示为单位体积的泡沫试样被压缩到一定应变时所吸收的能量, 即泡沫试样在其致密应变下的应力-应变曲线与坐标轴所围成的面积。能量吸收值的计算方法如公式 (2) 所示。

$$W = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

式中, W 代表单位体积的泡沫试样的能量吸收值, ε_m 为任意应变, σ 为应力, 是应变 ε 的函数。

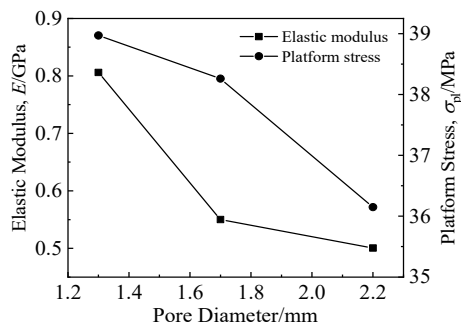


图 6 多孔 CoCrNi 中熵合金的弹性模量和孔隙率与孔径的关系

Fig.6 Relationship among elastic modulus, porosity and pore size of porous CoCrNi MEA

表 1 为不同孔隙率的多孔 CoCrNi 中熵合金和泡沫铝在其致密应变下单位体积的能量吸收值。由于应力-应变曲线上平台阶段到致密阶段没有突然的转变, 因此, 根据平台阶段和致密阶段曲线切线的交点来确定致密应变 ε_d ^[29]。由表可知, 孔隙率为 63%~78% 的多孔 CoCrNi 中熵合金对应的能量吸收值为 34.81~14.25 MJ/m³, 且随着孔隙率的增大而减小。这是因为能量吸收值的大小直接依赖于平台应力值和平台区宽度这 2 个参数。结合应力-应变曲线可知, 当孔径一定时, 随着孔隙率的增加, 平台应力降低, 而平台区的宽度会变大。而最终能量吸收值减小, 说明多孔 CoCrNi 中熵合金的吸能性能主要受平台应力影响, 而平台区宽度对其影响相对较小, 即平台应力对能量吸收值的贡献更大。

对比均采用粉末冶金制备的多孔 CoCrNi 中熵合金和泡沫铝^[7] (多孔 CoCrNi 中熵合金平均孔径为 1.7 mm, 泡沫铝孔径为 1.6~2.0 mm) 在其致密应变下单位体积的能量吸收值可以得出, 当孔隙率相同时, 多孔中熵 CoCrNi 合金单位体积的能量吸收值为泡沫铝的 3.8 倍, 由此可得, 多孔 CoCrNi 中熵合金可作为一种性能优良的吸能材料。

表征泡沫材料吸能特性的另外一个重要指标是吸能效率, Miltz 等^[30]提出使用吸能效率 (E) 和理想吸能效率 (I) 来研究泡沫材料的能量吸收能力, 定义如公式 (3) 和公式 (4) 所示。

$$E = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_m} \quad (3)$$

$$I = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_m \varepsilon_m} \quad (4)$$

式中, ε_m 为任意应变, σ_m 为与 ε_m 对应的应力, σ 为应力, 是应变 ε 的函数。 E 为能量吸收值与其对应的应力之比, 用来确定泡沫材料吸能的最优工作状态。 I 为能量吸收值与理想泡沫材料在相同的应力和应变下吸能的比值, 即在任意应变下, 泡沫材料的应力-应变曲线与其坐标轴所围成的面积与其对应的矩形的面积之比, I 反映了真实的泡沫材料与理想吸能材料的接

表 1 多孔 CoCrNi 中熵合金和泡沫铝能量吸收值

Table 1 Energy absorption values of porous CoCrNi MEA and aluminum foam

Sample	Porous CoCrNi MEA					Aluminum foam ^[7]
$\theta/\%$	63.21	66.31	69.89	73.86	77.66	70
$\varepsilon_d/\%$	53.23	55.43	57.13	58.59	61.33	65
$W/\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	34.81	32.17	24.79	19.93	14.25	7.39

近程度, 常用来对不同泡沫材料的吸能特性的优劣进行评估。

图 7 为不同孔隙率的多孔 CoCrNi 中熵合金试样的 E - σ 曲线, 由图可知, 孔隙率为 63.21%~77.66% 的吸能效率范围为 0.3~0.33, 吸能效率最大值所对应的应力按照孔隙率的降序分别是 47.28, 70.31, 84.91, 101.91, 116.73 MPa, 此应力与致密应力很接近, 说明多孔 CoCrNi 中熵合金在最大吸能效率下工作时, 吸能特性可以得到充分的发挥。

图 8 为 5 种不同孔隙率的多孔 CoCrNi 中熵合金的理想吸能效率 I - σ 曲线, 由图可知, 5 种孔隙率的最大吸能效率都接近 0.8, 而且其最大理想吸能效率所对应的应力值按照孔隙率降序依次为 19.67, 31.15, 37.76, 53.42, 61.5 MPa, 此应力与屈服平台应力很接近。理想吸能效率 I 越大, 吸能部件在工作过程中的载荷波动越小, 相应地, 吸能部件的吸能性能越好, 使得被保护装置得到更有效的保护。综上可知 5 种多孔 CoCrNi 中熵合金均可作为性能优良的吸能材料。

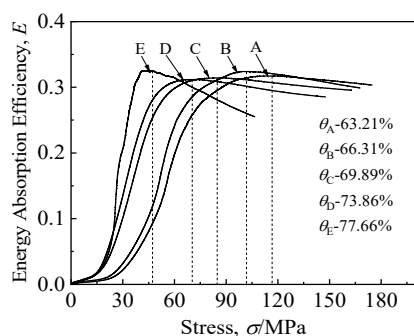


图 7 不同孔隙率多孔 CoCrNi 中熵合金的吸能效率曲线
Fig.7 Energy absorption efficiency curves of porous CoCrNi MEA with different porosities

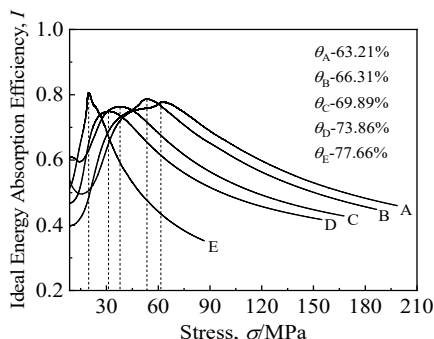


图 8 不同孔隙率多孔 CoCrNi 中熵合金的理想吸能效率曲线
Fig.8 Ideal energy absorption efficiency curves of porous CoCrNi MEA with different porosities

3 结 论

1) 采用粉末烧结-溶解法成功制备了孔隙率为 63%~78%, 孔径 1.3~2.2 mm 的多孔 CoCrNi 中熵合金试样, 样品的孔形貌为近球形, 孔分布比较均匀且孔的连通性较好。

2) 当孔径一定时, 随着孔隙率的增大, 弹性模量从 2.09 GPa 减小到了 0.42 GPa, 减小了 79.9%; 平台应力从 63.4 MPa 减小到了 19.96 MPa, 减小了 68.5%; 当孔隙率一定时, 随着孔径的增大, 弹性模量从 0.8 GPa 减小到了 0.5 GPa, 减小了 37.5%; 平台应力从 38.97 MPa 减小到了 36.15 MPa, 下降了 7.23%。可见, 多孔 CoCrNi 中熵合金的弹性模量和屈服平台应力均随孔隙率、孔径的增大而减小; 相对孔隙率而言, 孔径对力学性能的影响程度较低。

3) 孔隙率为 63%~78% 的多孔 CoCrNi 试样在其致密应变下单位体积的能量吸收值为 34.81~14.25 MJ/m³, 约为泡沫铝的 3.8 倍。5 种不同孔隙率的多孔 CoCrNi 试样理想吸能效率 (I) 都接近 0.8, 说明多孔 CoCrNi 中熵合金可以作为一种理想的吸能材料。

参考文献 References

- [1] García-Moreno F. *Materials*[J], 2016, 9(2): 85
- [2] Dannemann K A, Lankford J. *Materials Science and Engineering*[J], 2000, 293(1): 157
- [3] Cao Lihong(曹立宏), Ma Ying(马颖). *Gansu Science and Technology*(甘肃科技)[J], 2006(6): 117
- [4] Davies G J, Shu Z. *Journal of Materials Science*[J], 1983, 18(7): 1899
- [5] Xu Qingyan(许庆彦), Chen Yuyong(陈玉勇), Li Qingchun(李庆春). *Foundry Equipment & Technology*(铸造设备研究)[J], 1997(1): 18
- [6] Han Fusheng(韩福生). *Spacecraft Environment Engineering* (航天器环境工程)[J], 2013, 30(6): 570
- [7] Yang Xudong(杨旭东), Shi Jian(石建), Cheng Jie(程洁) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2017, 37(2): 55
- [8] Yeh J W, Chen S K, Lin S J et al. *Advanced Engineering Materials*[J], 2004, 6(5): 299
- [9] Zhang Chao(张超), Liu Jie(刘杰), Wang Xiaohua(王晓花) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(7): 2673
- [10] Han Z D, Luan H W, Liu X. *Materials Science & Engineering A*[J], 2018, 712: 380
- [11] Masemola Khumo, Popoola Patricia, Malatji Nicholus.

- Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(3): 5241
- [12] Song Xinfang(宋鑫芳), Zhang Yong(张勇). *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2022, 40(5): 451
- [13] Alijani F, Reihanian M, Gheisari K. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2020, 256: 123675
- [14] Zhang Kai(张凯), Wu Yinjiang(吴引江), Liu Gaojian(刘高建) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2023, 42(10): 814
- [15] Zhou Canxu(周灿旭), Liu Yuan(刘源). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(2): 637
- [16] Yan Fei(闫霏), Du Xinghao(杜兴蒿), Jin Chengyan(金城焱) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(1): 179
- [17] Weng Fei, Chew Youxiang, Zhu Zhiguang *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 34: 101202
- [18] Moravcik Igor, Cizek Jan, Kovacova Zuzana *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 701: 370
- [19] Sathiaraj G D, Skrotzki W, Pukenas A *et al. Intermetallics*[J], 2018, 101: 87
- [20] Son Hansol, Nam Seungjin, Choi Hyunjoo. *Powder Metallurgy*[J], 2021, 64(3): 211
- [21] Xu Zhengkai, Zhu Zhiguang, Wang Pan *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 35: 101441
- [22] Li Gang(李刚), Yu Zhongmin(于中民), Wen Ying(温影) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(12): 4502
- [23] Yan Feihong(闫飞虹), Li Lingyun(李玲芸), Zhou Xing(周行) *et al. Journal of Analytical Science*(分析科学学报)[J], 2022, 38(2): 173
- [24] Lan Di, Zhao Zehao, Gao Zhengguo *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2020, 512: 167065
- [25] Xie Bo(谢波), Zhou Yun(周芸), Guo Kunshan(郭坤山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(1): 279
- [26] Liu Peisheng(刘培生), Ma Xiaoming(马晓明). *Methods for Testing Porous Materials*(多孔材料检测方法)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 14
- [27] Yu Lili(于丽丽), Li Aiqun(李爱群), Xie Linlin(解琳琳) *et al. Architecture Technology*(建筑技术)[J], 2018, 49(3): 315
- [28] Mu Jianchun(穆建春), Xi Huifeng(习会峰), Long Zhiqin(龙志勤). *Journal of Experimental Mechanics*(实验力学)[J], 2009, 24(3): 223
- [29] Paul A, Ramamurty U. *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 281(1): 1
- [30] Miltz Joseph, Gruenbaum Gad. *Polymer Engineering & Science*[J], 1981, 21(15): 1010

Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Porous CoCrNi Medium-Entropy Alloy

Jia Qiaorui¹, Wang Xiaohua², Liu Jie², Ma Shengguo¹, Wang Zhihua¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The porous CoCrNi medium-entropy alloys with porosity of 63%-78% and pore size of 1.3-2.2 mm were prepared by powder sintering and dissolution method. The pore morphology and phase constitute of the samples were analyzed by SEM and XRD, and the axial quasi-static compression experiments were conducted on the samples. The results show that the elastic modulus and yield platform stress of porous CoCrNi alloy decrease with the increase in porosity and pore size. Compared with porosity, the effect of pore size on mechanical properties is low. The energy absorption value per unit volume in porous CoCrNi medium-entropy alloys with different porosities ranges from 34.81 MJ/m³ to 14.25 MJ/m³ under dense strain, which is about 3.8 times larger than that of aluminum foam, and the ideal energy absorption efficiency (*I*) of the alloys with five kinds of porosities is close to 0.8, indicating that the porous CoCrNi medium-entropy alloy has the potential to become an ideal energy absorption material.

Key words: porous medium-entropy alloy; powder metallurgy; CaCl₂; mechanical properties; energy absorption characteristic

Corresponding author: Ma Shengguo, Ph. D., Professor, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: mashengguo@tyut.edu.cn