

金属基复合泡沫材料基体及力学性能研究进展

孙少祥¹⁾, 历长云¹⁾✉, 唐玲¹⁾, 高琦¹⁾, 许磊¹⁾

1) 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 工学院, 新疆克拉玛依 834000

通信作者: 历长云, E-mail: lichangyun@cupk.edu.com

摘要 金属基复合泡沫(Metal Matrix Syntactic Foam, 简称MMSF)是由空心微球和金属基体复合而成的一种新型多孔复合材料。相较于普通泡沫材料, MMSF具有密度低、比强度高及吸能性好等优异性能。其密度可根据孔隙结构设计来满足需求, 从而使其在吸收和分散冲击载荷方面表现出色。因此, MMSF在航空航天、汽车工业和建筑工程等领域具有诸多应用潜力。本文概述了MMSF基体材料的选择和制备工艺的研究现状, 分析了基体的选择对MMSF试样的密度、抗压强度、吸能能力等性能的影响规律, 可以为MMSF的进一步研究提供借鉴。

关键词 金属基复合泡沫; 金属基体; 密度; 抗压强度; 吸能能力

中图分类号 TB331

Progress in the study of metal-based composite foam material matrix and mechanical properties

SUN Shaoxiang¹⁾, LI Changyun¹⁾✉, TANG Ling¹⁾, GAO Qi¹⁾, XU Lei¹⁾

1) Faculty of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay, Xinjiang 834000, China

✉Correspondence author: Li Changyun, E-mail: lichangyun@cupk.edu.com

ABSTRACT Metal Matrix Syntactic Foam (MMSF) is a novel type of porous composite material comprising hollow microspheres and a metal matrix. In comparison to conventional foam materials, MMSF exhibits superior properties, including low density, high specific strength and excellent energy absorption. Its density can be tailored to align with the pore structure, rendering it an optimal choice for absorbing and dispersing impact loads. Consequently, MMSF holds immense potential for applications in the aerospace, automotive and construction industries. This paper outlines the current research status of the selection of MMSF matrix materials and preparation process. It also analyses the influence law of matrix selection on the properties of MMSF specimens, such as density, compressive strength and energy absorption capacity. This can provide a reference for further research on MMSF.

KEY WORDS: Metal-based composite foam, Metal matrix, Density, Compressive strength, Energy absorption capacity

收稿日期:

基金项目: “天山英才”培养计划(2023TSYCJC0033); 克拉玛依市科技计划项目(20232023hjcxrc0008, 20232023hjcxrc0016); 克拉玛依市创新杰出青年人才项目(XQZX20230103)

1 引言

金属基复合泡沫材料主要由金属基体和空心微球复合而成，因此又被称为闭孔金属基复合泡沫。金属基复合泡沫由于其比表面积和比密度比较大，比单一金属或金属化合物具有更加轻质，更加优良的比力学性能且吸能能力更好等优秀性能，应用领域更加广泛^[1-3]。一般地，根据其轻质高强的特点，适用于制造轻量化结构材料，如在航空航天、汽车制造等领域中可以用于制造各种零部件，有效降低整体重量，提高燃油效率和性能。而由于其具有优秀的吸能性能，能够有效吸收和分散能量，在碰撞或冲击时提供良好的保护作用，因此，在汽车安全、建筑结构、军事装备等领域中，常用于制造各类缓冲材料、防护装置等。并且，金属基复合泡沫材料因其孔隙结构和金属基体的材料特性，在汽车、船舶、航空航天等领域中，可用于制造隔音材料、振动吸收器等，提升车辆或设备的舒适性和性能。此外，由于金属的良好导热性能，在航空航天、能源装备、电子器件等领域中，可用于制造散热器、隔热层等，提高设备的热效率和性能稳定性。金属基复合泡沫材料结构和特性受到很多因素的影响，包括基体材料和填充材料的选取、制备工艺以及制备环境等。其中，基体材料是闭孔金属基复合泡沫的性能的主要影响因素之一，常用的金属基体材料有铝、镁、锌、钢、铜、钛等，各元素基本性能参数如表 1 所示。选择不同的金属作为基体，可以获得不同性能的产品。例如，铝基复合泡沫相比于镁基复合泡沫具有更高的压缩应变，更好的吸能性能，这是由于铝具有较高的强度和塑性^[4]。

此外，基体和填充材料的相容性和亲和性也会影响复合泡沫的性能，相互作用力强的基体和填充材料，往往导致更好的界面相互作用和更好的结合强度。而金属基体表面状态会导致填充材料的完整性有所不同。对于镁基复合泡沫和钢基复合泡沫来说，表面处理可以减少泡沫坍塌和缩孔等现象，提高泡沫材料的物理和力学性能^[5]。相比未处理过表面的基体材料，采用经过表面处理的材料也会使所制备的产品更具有稳定性。已有学者针对闭孔金属基复合泡沫材料的空心微球种类，包括陶瓷空心微球（主要成分有飞灰、 Al_2O_3 空心微球及 SiC 空心微球 SiC_{HP} ）、玻璃微珠、浮石（LECAP，一种低成本天然多空火山石粉末）等以及其主要特性进行总结分析^[6,7]。同时讨论了目前 MMSF 的多种制备方法^[8]，包括：粉末冶金法(PM)^[9-13]、搅拌铸造法(SC)^[14-17]、压力渗透法^[18-22]、喷涂喷射沉积法^[23]及增材制造技术(AM)^[24]等。本文从近年来闭孔金属基复合泡沫制备所用的基体材料选取着手，总结概括了基体材料的选择对金属基复合泡沫材料组织结构和力学性能的影响规律。

表 1 几种常见金属基体元素的性能参数
Table 1 Performance parameters of various metal matrix materials

金属元素	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	熔点($^{\circ}\text{C}$)	导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$)	导电系数($\text{MS}\cdot\text{m}^{-1}$)	杨氏模量(GPa)	泊松比	布氏硬度(MPa)
Al	2.700	660.32	235	38	70	0.35	245
Mg	1.738	650	160	23	45	0.29	260
Fe	7.874	1538	80	10	211	0.29	490
Cu	8.960	1084.62	400	59	130	0.34	874
Zn	7.140	419.53	120	17	108	0.25	412
Ti	4.507	1668	22	2.5	116	0.32	716

2 铝基复合泡沫

铝具有轻质高强的特点，其密度仅为 $2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，比其它传统金属如钢、铜等轻得多，其比强度非常高。铝的导热系数比钢高 3 倍，具有良好导热性和导电性能。因此，铝及其

合金是作为基体制备金属复合泡沫的热门材料之一^[25]。铝基复合泡沫材料的密度、抗压强度和吸能能力等性能主要受到孔隙率、基体材料的选择、填料的种类和含量、制备工艺等多种因素的综合影响^[26]。

孔隙率是材料内部孔隙体积与总体积的比值。一般地，随着孔隙率的增大，金属复合泡沫的强度会降低。因为孔隙率增加意味着固体材料的含量减少，从而削弱了其结构强度。此外，空心球填充所形成的孔隙可以为材料提供更好的传热性能，因为它们可以促进更均匀的热对流，而孔隙的分布则会影响金属复合泡沫的均匀性和稳定性^[27-31]。例如，范琦琪等^[27]采用 PM 技术制备出了 0.30、0.39、0.49、0.57 四种不同孔隙率的不锈钢空心球/铝基复合泡沫。根据图 1 所示的压缩应力-应变曲线可以看出，其中孔隙率为 0.39 的复合泡沫压缩应变能力和吸能能力最好，抗压强度约为 180 MPa，吸收能量为 $65.15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而孔隙率在 0.57 的复合泡沫的抗压强度仅有约 100 MPa，吸收能量为 $34.49 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由此可以得出，孔隙会引入应力集中点，破坏材料的连续性和均匀性，较高孔隙率使得铝基复合泡沫材料的抗压强度降低，并且由于材料内部节后不均匀，降低了吸能时能量的传递效率，是材料的吸能能力下降。

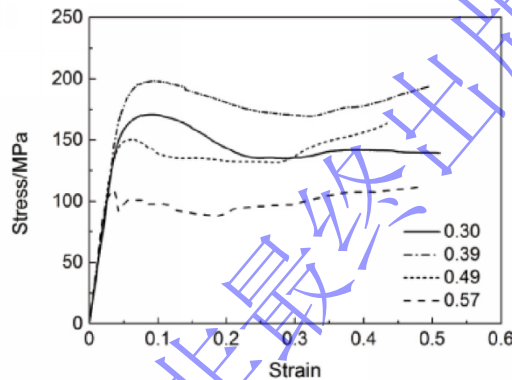


图 1 不同孔隙率的不锈钢空心球/Al 复合泡沫的压缩应力-应变曲线^[27]

Fig. 1 Compressive stress-strain curves of stainless steel hollow spheres/Al composite foams with different porosities^[27]

Huang 等^[32]通过低温微压渗透技术制备的 H40(标准密度 $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 HGBs)/7075Al 基复合泡沫，尽量降低空心玻璃微球损伤率，获得的试样最低密度为 $1.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。如图 2 所示，在准静态载荷下，H40/7075Al 具有的最高抗压强度约为 243.31 MPa，吸能能力在 $38.07 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3} - 99.51 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间内。而在另一项研究^[33]中，同样选用陶瓷空心球作为填充材料，以纯 Al 和 Al-12 wt%Si 两种不同基体材料为基体，对比了基体材料对复合泡沫在室温下压缩变形的影响。如图 3 所示，在应力水平为 60 MPa 时，两种泡沫材料均明显破坏。分析上述两组复合泡沫发现，铝基复合泡沫变形和破坏受到基体材料塑性变形的影响较大，对比 Al、AlSi12 和 7075 Al 合金为基体制备的复合泡沫的压缩应力-应变关系，20%应变条件下，AlSi12 基复合泡沫抗压强度明显下降，而 7075 Al 基复合泡沫的抗压强度相对较高。原因在于，Al 基复合泡沫材料和 7075Al 基复合泡沫发生塑性变形，变形后期会形成坍塌带，减缓了应力的集中，从而提高材料的承载能力，而 AlSi12 基泡沫变形后期形成了高度局部化的脆性断裂，其没有塑性变形的缓冲过程，而是在承载能力达到极限时突然失效，使得其抗压强度明显较低。

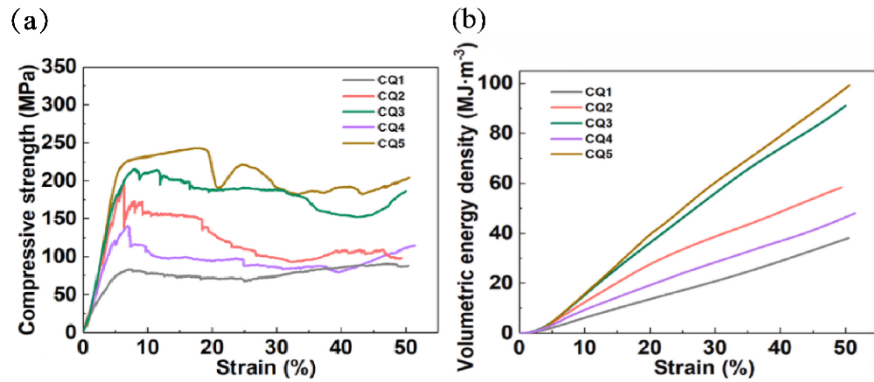


图 2 (a)准静态载荷下 HGBs/Al 复合泡沫的压缩应力-应变曲线；(b)准静态载荷下 HGBs/Al 复合泡沫的体积能量密度（其中 CQ1、CQ2、CQ3、CQ4 和 CQ5 分别代表准静态压缩下的 H20/2024Al、H40/2024Al、H60/2024Al、H40/6061Al 和 H40/7075Al）^[32]

Fig. 2 (a) Compressive stress-strain curves of HGBs/Al composite foams under quasi-static loading; (b) Volumetric energy density of HGBs/Al composite foams under quasi-static loading (where CQ1, CQ2, CQ3, CQ4 and CQ5 represent H20/2024Al, H40/2024Al, H60/2024Al, H40/6061Al, H40/7075Al)^[32]

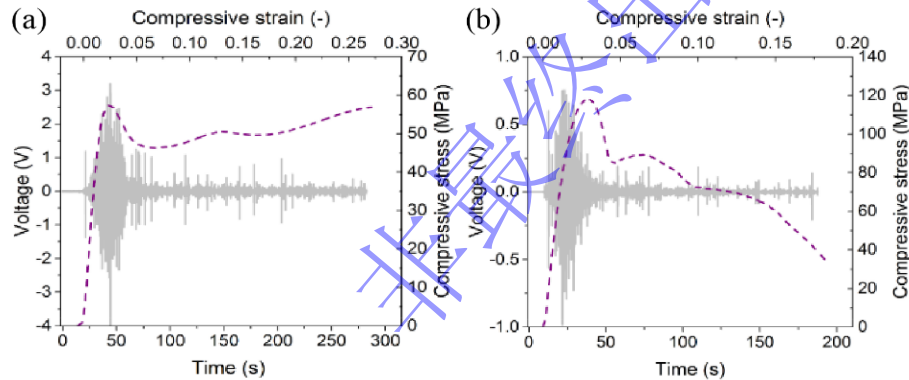


图 3 不同填充材料的铝基复合泡沫压缩应力-应变曲线^[33]：(a)空心陶瓷球/Al 复合泡沫(虚线)；(b)空心陶瓷球/AlSi12 复合泡沫(虚线)

Fig. 3 Compressive stress-strain curves of aluminum-based composite foams with different filling materials^[33]: (a) hollow ceramic spheres/Al composite foam (dashed line); (b) hollow ceramic spheres/AlSi12 composite foam (dashed line)

对于添加硅(Si)来增强基体以强化铝基复合泡沫的强度和刚度的研究还有很多^[34,35]。硅作为一种增强剂与铝基体形成复合产物，改善材料之间的界面结合力，进而提高了材料的抗压强度和吸能能力等力学性能。杨旭东等^[35]研究了不同 Si 元素含量对碳纳米管(CNTs)/Al-Si 复合泡沫的影响。如图 4 所示，当 Si 质量分数为 7 wt%时，CNTs/Al-Si 复合泡沫的屈服强度和平台应力分别相较于不添加 Si 元素的情况提高了 58.5%和 117.8%。由此可以得出：添加适量的 Si 元素对 CNTs/Al-Si 复合泡沫的力学性能具有正向影响，其可以使复合材料更具抗压强度、吸能能力等，能够提高其在各种载荷情况下的性能表现。这些发现对 HGBs/AlSi12 复合泡沫材料^[36-38]及其它多元元素铝合金复合泡沫^[39-43]的制备和性能研究具有重要的指导意义。

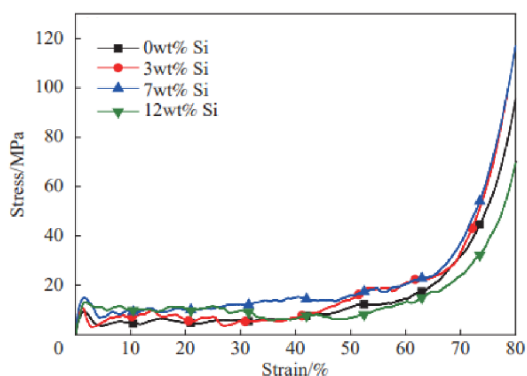


图 4 不同含量 Si 的 CNTs/Al-Si 复合泡沫压缩应力-应变曲线^[35]

Fig. 4 Compressive stress-strain curves of CNTs/Al-Si composite foams with different contents of Si^[35]

铝合金由于含有不同种类的合金元素，其机械性能通常优于纯铝。其中元素可以与空心球反应，形成固溶体或金属间化合物，能够显著提高泡沫材料的强度、韧性等性能。Maroti 和 Orbulov^[44]进行了铝合金基复合泡沫的性能研究。他们采用液相低压浸渗法制备了不同填充材料的复合泡沫，分别为高强度空心陶瓷（CHS）/AlSi7Mg 和低强度 LECAP/AlSi7Mg 复合泡沫。如图 5 所示，CHS 作为填充材料的复合泡沫抗压强度在 50 MPa-110 MPa 之间，且随着压力水平的增加，抗压能力曲线表现出平缓的区域。而 LECAP 作为填充材料的复合泡沫抗压强度仅在 20 MPa-80 MPa 之间，且随着压力水平的增加，抗压能力出现下降趋势。研究认为，较强的 CHS 填料导致了解理断裂，而较弱的 LECAP 填料导致样本发生塑性塌陷。

Orbulov 团队^[45]进一步研究了使低强度 LECAPs 与不同铝合金制备的复合泡沫材料，分别是 LECAPs/Al99.5 和 LECAPs/AlSi9MgMn 复合泡沫。通过改变 LECAPs 的平均尺寸，所制备的复合泡沫的密度在 $1.38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ - $1.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 范围内变化。针对 AlSi9MgMn 基复合泡沫材料，研究团队测试了其抗压强度、屈服强度、平台强度和能量吸收性能。如图 5(c) 所示，产品的抗压强度在 22.3 MPa - 83.1 MPa 范围内变化，屈服强度为 20.9 MPa - 81.7 MPa，平台强度为 17.0 MPa - 95.6 MPa，吸收能量为 $8.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ - $48.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。上述材料性能与之前研究的铝基复合泡沫材料的性能相比，这些铝合金基复合泡沫材料具有更优异性能。特别是 AlSi9MgMn-4-T6 样品在比平台强度和比吸收能方面表现出了卓越的性能。值得注意的是，所有的铝合金基复合泡沫材料都表现出了塑性坍塌失效的特点，并没有观察到任何剪切带的形成或局部脆性断裂，使得这些材料的抗压强度通常会相对较高，相应的吸能能力也较高。

通过 Orbulov 团队两组实验对比可以看到，使用高强度的 CHS 作为填充材料的复合泡沫表现出较高的抗压强度，而使用低强度 LECAP 作为填充材料的复合泡沫抗压强度较低。并且，复合泡沫的失效模式取决于填充材料的性质，CHS 填料导致解理断裂，LECAP 填料导致塑性塌陷。此外，通过对比 LECAP 与不同铝合金基体制备的复合泡沫材料可以看出，这些材料表现出较高的抗压强度、屈服强度和能量吸收性能。

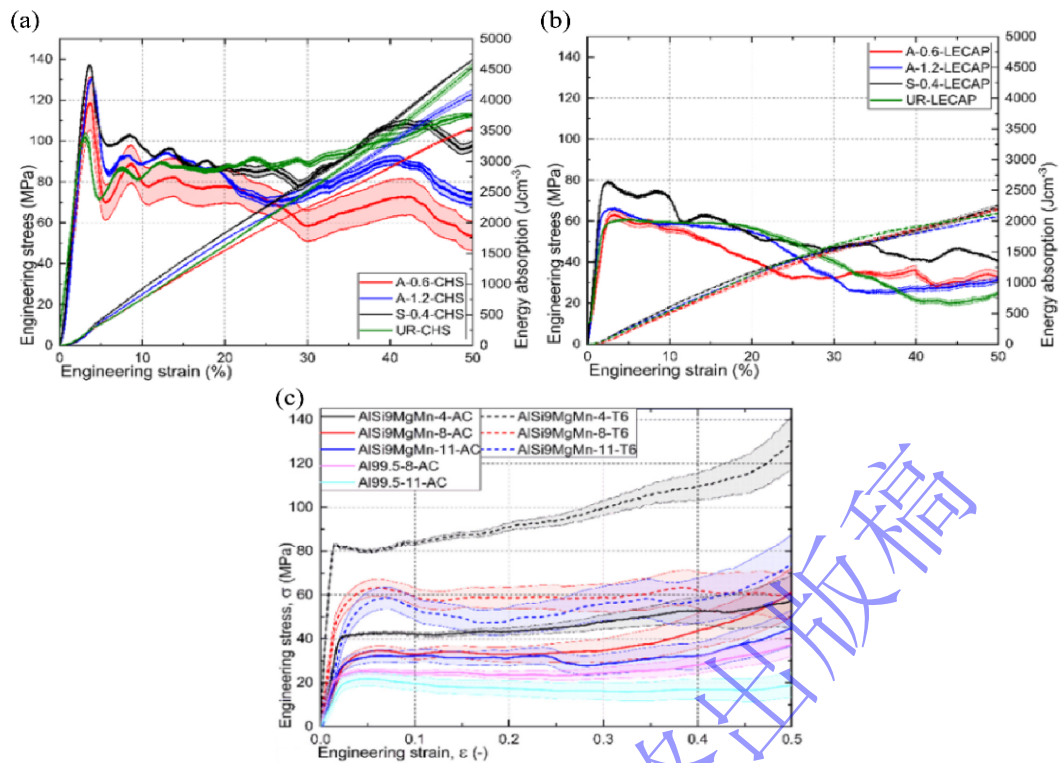


图 5 多元铝合金基复合泡沫的压缩应力-应变曲线^[44,45]: (a)CHS/AlSi7Mg 复合泡沫; (b)LECAP/AlSi7Mg 复合泡沫; (c)LECAPs/AlSi9MgMn 复合泡沫

Fig. 5 Compressive stress-strain curves of polyaluminum alloy-based composite foams^[44,45]: (a) CHS/AlSi7Mg composite foam; (b) LECAP/AlSi7Mg composite foam; (c) LECAPs/AlSi9MgMn composite foam

近年来, 铝基复合泡沫的研究已经取得了一些进展。铝及其合金作为基体制备的复合泡沫具有低密度、高强度和良好的吸能能力等特性。由图 6 的数据显示, 研究中已经成功制备出密度最低为 $0.7446 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的铝基复合泡沫, 但其抗压强度仅为 31.5 MPa , 吸收能量为 $32.12 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。另外, Thiyagarajan 等^[40]通过添加 6%陶瓷空心微球制备的 Al-Si8Cu3Fe 基复合泡沫的抗压强度最高, 达到了 289.53 MPa 。其中, Huang 等^[32]制备的 7075 铝合金基复合泡沫, 其将复合泡沫密度降低至 $1.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的同时, 最高抗压强度和吸能能力分别达到了 243.31 MPa 和 $99.51 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, 是报道中吸能能力最好的铝基复合泡沫之一。在过去的研究中, 学者们已经对如何改善铝基复合泡沫的性能进行了探讨, 包括选取不同填充材料研究填充材料对其力学性能的影响、孔隙结构对其变形和抗压强度的影响、制备过程中添加增强剂或者选用多元铝合金改善机体性能等。目前, 学者们正在进一步研究增强基体强度和耐磨损性等方面, 以进一步拓宽铝基复合泡沫的应用领域。

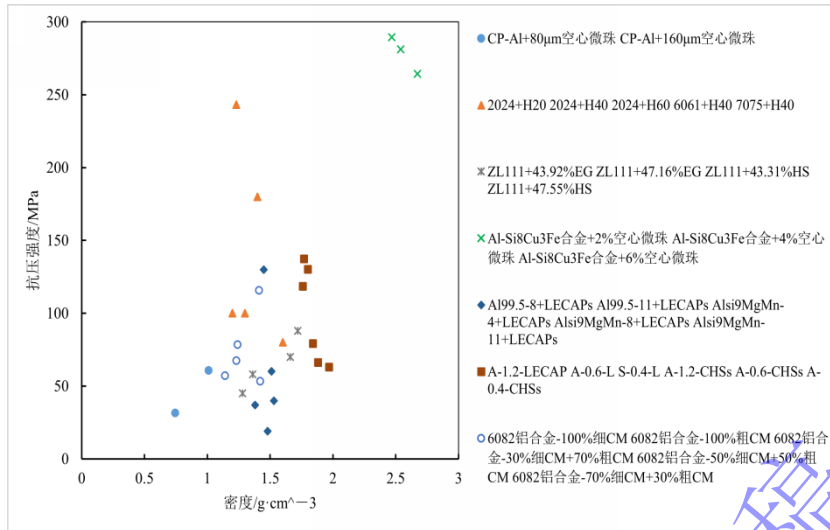


图 6 铝基复合泡沫性能比较^[25,32,39-41,44,45]

Fig. 6 Comparison of the performance of some aluminum-based composite foams^[25,32,39-41,44,45]

3 镁基复合泡沫

镁的密度仅有 $1.74 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,其密度低,比强度高,在很多领域都有广泛的应用^[46]。镁作为基体制备复合泡沫具有轻质、高强度、优良的隔音降噪性能、良好的热稳定性以及易于加工和成型等优点,使得镁基复合泡沫材料在航空、汽车、建筑等领域具有广泛的应用前景。

镁基复合泡沫的研究主要包括:不同密度下产品的强度及吸能能力、基体与空心球之间界面行为变化及孔隙率对复合泡沫材料的性能影响等。Padnuru Sripathy 等^[47]采用混合微波烧结技术成功制备了玻璃微球(GMB)/镁基复合泡沫材料。该研究表明,通过增加空心微球的比例,可以显著降低材料的密度,并提高其吸能能力。由表 2 可以看出,当添加 20 wt% GMB 空心颗粒时,复合材料的密度为 $1.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比纯镁降低了约 26%。同时,极限抗压强度达到 280 MPa,比纯镁提升了约 10%,吸收能量为 $40.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$,比纯镁提升了约 65%。此时,镁基复合泡沫的比强度相比纯镁提高了 49%。其它 GMB/镁基复合泡沫的能量吸收也均得到增强。如图 7 所示,在应力条件达到 16%时,纯镁的抗压强度已经达到最高且下降,而 GMB/镁基复合泡沫的抗压强度在 20%应力条件时才表现明显下降趋势。该研究证明了镁基复合泡沫材料的力学性能均比纯镁的更加优异,并且由于空心球的加入,其密度较纯镁更低,能够适用的领域也会更加广泛。

表 2 GMB/镁基复合泡沫样品的压缩特性^[47]

Table 2 Compression characteristics of GMB/Magnesium-based composite foam specimens^[47]

材料	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.2%压缩屈服应力(MPa)	极限压缩应力(MPa)	断裂应变 (%)	能量吸收($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	比强度($\text{MPa}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Pure Mg	1.73	98±2	254±6	15.8±0.5	24.8±0.8	147
Mg-5GMB	1.59	91±2(↓7%)	321±7(↑26%)	19.5±0.6(↑3%)	38.8±1.3(↑56%)	202(↑37%)
Mg-10GMB	1.46	88±1(↓10%)	287±6(↑13%)	19.6±0.7(↑2%)	36.3±1.6(↑46%)	197(↑34%)
Mg-20GMB	1.28	85±1(↓13%)	280±4(↑10%)	22±2(↑39%)	40.8±3.2(↑65%)	219(↑49%)

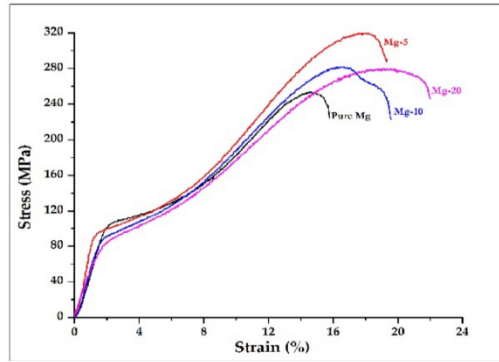
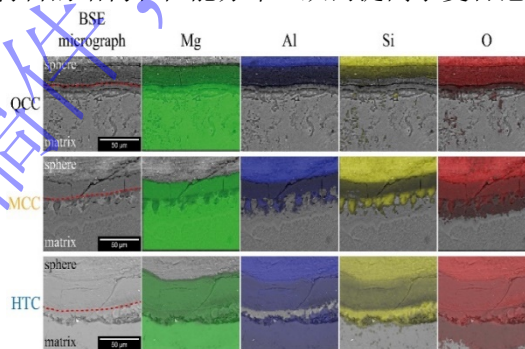


图 7 GMB/镁基复合泡沫压缩应力-应变曲线^[47]

Fig. 7 Compressive stress-strain curve of GMB/Mg-based composite foam^[47]

Kubelka 等^[48]采用低压浸渗法制备 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-莫来石}$) 空心陶瓷球/镁基复合泡沫, 并分析了其界面层上的压缩行为。由图 8(a) 的 EDX 映射图可以明显观察到, 在三种复合泡沫的基体与填充材料之间的界面区域发生了不同程度的 O 和 Al 元素的有效渗透。该反应区域主要由空心球内的贫化层和含有 Al、Si 和 O 元素的界面层组成, 其中贫化层相对于空心球内部含有较少的 Al 和 Si 元素。在贫化区域中, 发现了 Mg 元素含量的增加, 同时 Al、Si 和 O 元素的浓度下降。这可能是由于熔融的 Mg 与球体内的贫化氧化铝和二氧化硅发生反应, 导致在界面上形成了新的物相。由图 8(b) 中 MCC 样品的 BSE 显微照片可以看出, Mg₂Si 和 Al 富相交替组成界面层, 陶瓷空心球和 Mg 基体之间的结合对泡沫的力学性能具有一定影响, 且其中 O 的变化进一步增强了陶瓷球和 Mg 之间的结合作用。试样的密度和孔隙率分别为 $1.62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 25%, 抗压强度在 56.62 MPa - 84.30 MPa 之间。该研究为镁基复合泡沫的性能研究提供了新的思路, 镁及其合金在制备过程中往往与空心球发生界面反应产生新的物相或者间化物, 形成了强化的界面结合。这种强化的界面结合可以有效防止界面剥离或滑移, 提高材料的力学性能, 如强度和韧性。此外, 界面反应形成的新物相还在微观层面上改善了材料的结构和性能分布, 从而提高了复合泡沫材料的整体性能。



(a)

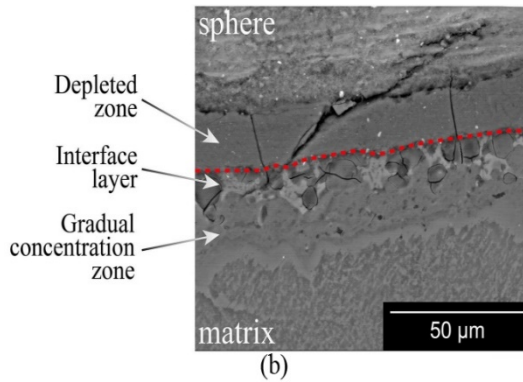


图 8 空心陶瓷球/Mg 基复合泡沫微观图像^[48]: (a)QCC、MCC 和 HTC 的复合泡沫与四种存在元素 Mg、Al、Si 和 O 的各自界面的 EDX 映射; (b)具有贫化区、界面层和界面上相邻逐渐变化的浓度区的 MCC 样品的 BSE 显微照片 (在 BSE 显微照片中, 界面用红色虚线表示)

Fig. 8 Micrographs of hollow ceramic spheres/Mg-based composite foams^[48]: (a) EDX mapping of the composite foams of QCC, MCC and HTC at their respective interfaces with the four elements present: Mg, Al, Si and O; (b) BSE micrographs of the MCC samples showing depletion zones, interfacial layers and adjacent progressively varying concentration zones at the interfaces (the interfaces are marked with a red dashed line in the BSE micrographs)

同样的, 选用镁合金来改善复合泡沫材料的性能也受到许多学者的关注。镁合金比纯镁具有更高的硬度和强度, 且有更好的可塑性和延展性, 应用于复合泡沫的制备中能够使其更具有稳定性。而相比于铝合金, 镁合金具有更轻、更高的强度重量比、更好的抗冲击性能、良好的加工性能、优秀的导热性能等多方面的优势, 因此受到很多国外学者的青睐。Braszczyńska-Malik 等^[49]采用低压渗透技术制备的粉煤灰微球(FAs)/AZ91 基复合泡沫, 其中所用空心微球的体积分数约为 60 vol%。所制备的复合泡沫中密度最小可达到 1.1893 g/cm³, 这比目前研究的大多数复合泡沫的密度小, AZ91 泡沫抗压强度为 24.49 MPa。如图 9 所示, 通过扫描电镜可以观察到 AZ91 原有的六方封闭堆积结构的 α -Mg 固溶体和 $\alpha+\gamma$ 分离共晶(其中 γ 为带 α -Mg 立方单元的 Mg₁₇(Al,Zn)₁₂ 型金属间化合物)以及反应中析出的不连续次级 γ 相。产生上述结果的原因可能是粉煤灰本身相对密度较低, 但其成分复杂, 容易在制备过程中与基体发生反应产生其它化合物, 影响试样的力学性能。Li 等^[50]采用热压烧结法制备 Al₂O_{3hs}/AZ91D, 并研究烧结温度其显微组织和力学性能的影响。如图 10 所示, 在实验过程中随着温度的升高产品的致密化程度越高, 其密度在 1.65 g·cm⁻³ - 1.85 g·cm⁻³ 之间, 且在 Al₂O_{3hs}/AZ91D 中会生成脆性 MgAl₂O₄ 相, 原因可能是 Al₂O_{3hs} 空心球存在破碎, 当温度过高, 镁熔化渗入球体中。如图 10(b)所示, Al₂O_{3hs}/AZ91D 的抗压强度随烧结温度的升高先升高后降低, 烧结温度在 693K 时所制备的产品抗压强度最高达到 163 MPa。

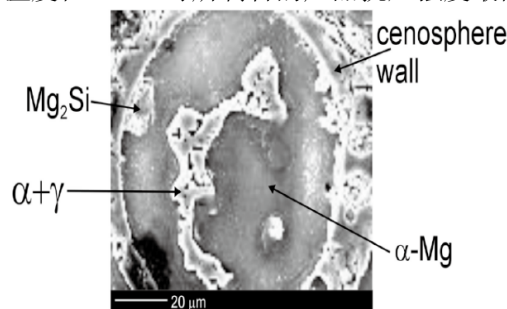


图 9 具有元素表面分布 (EDX) 的 FAs/AZ91 的 SEM 图像^[49]

Fig. 9 SEM image of FAs/AZ91 with elemental surface distribution (EDX)^[49]

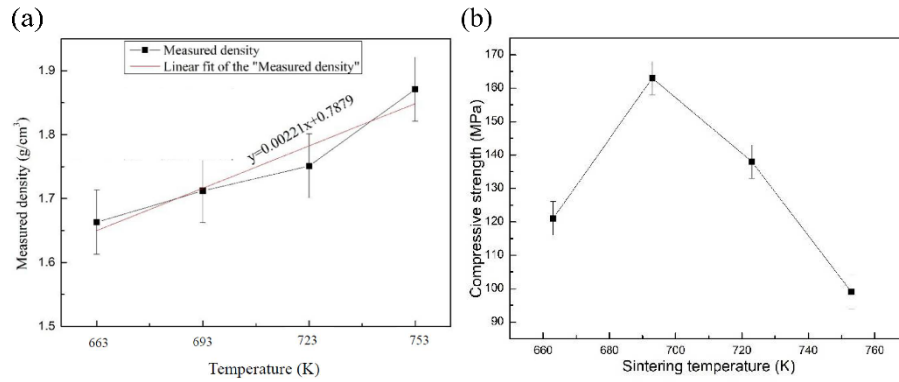


图 1 不同温度下 Al₂O₃_{hs}/AZ91D 的性能^[50]: (a) Al₂O₃_{hs}/AZ91D 的密度曲线; (b) 准静态下的抗压强度曲线

Fig. 10 Properties of Al₂O₃_{hs}/AZ91D at different temperatures^[50]: (a) density profile of Al₂O₃_{hs}/AZ91D; (b) compressive strength curves under quasi-static

Akinwekomi 等^[51]采用快速微波烧结结合粉末冶金技术所制备了两组碳纳米管(CNTs)/AZ61 基复合泡沫材料。其中 AZ61 基体的密度为 1.8 g·cm⁻³, 碳纳米管的密度为 2.6 g·cm⁻³, 因此, 碳纳米管增强复合泡沫的实验密度随着碳纳米管体积分数的增加而略有增加。如图 11 所示, CNTs/AZ61 孔隙分布均匀, 两组样品的孔隙率分别为 49%和 62%, 其中孔隙率 49%的复合泡沫抗压强度在 35.91 MPa - 47.24 MPa, 并且随着 CNTs 在基体中体积分数的增加, 抗压强度和能量吸收性能都显著提高。

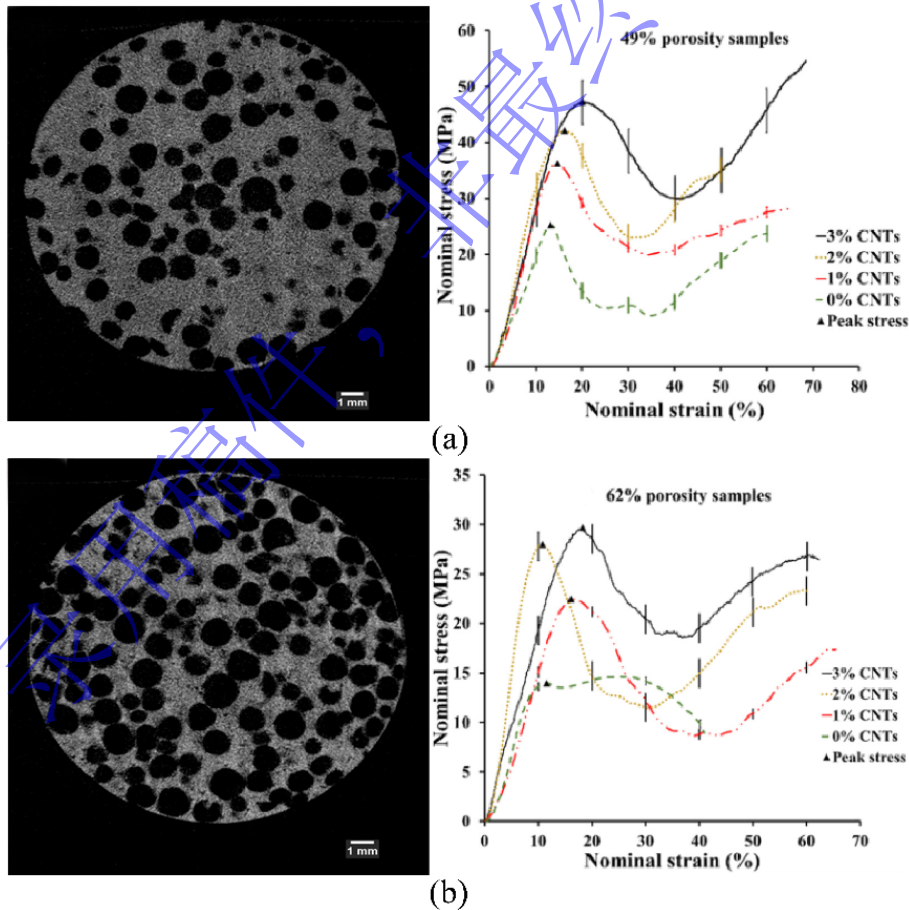


图 2 不同孔隙率 CNTs/AZ61 复合泡沫微观结构三维显微 CT 图像重建及对应的压缩应力-应变曲线^[51]: (a) 49%孔隙度; (b) 62%孔隙度

Fig. 1 3D micro-CT image reconstruction of the microstructure of CNTs/AZ61 composite foams with different porosities and the corresponding compressive stress-strain curves^[51]: (a) 49% porosity; (b) 62% porosity

分析前人研究可以发现，纯镁作为基体的复合泡沫具有较低的密度，但镁合金作为基体的复合泡沫未展现出优异的性能。这一现象产生的原因在于镁是一种活泼的金属元素，容易与填充材料或填充材料发生反应生成中间相，导致其抗压强度、延展性降低^[47,52]。因此，制备和改进镁基复合泡沫仍然是当前复合泡沫材料的研究热点。为解决制备复合泡沫材料强度较低的问题，研究者们选择高强度、高硬度的合金(AZ61、AZ91、AZ91D等)作为基体材料，以改善复合泡沫材料的强度和吸能能力^[49-51]。此外，使用高强度、高硬度的填充材料(如碳纳米管材料、等)，以优化复合材料的结构和性能^[51]。并且，通过表面处理技术(如氧化、镀层等)优化材料表面形貌和粗糙度，有利于提高复合材料的表面附着性和接触面积，从而增强材料的界面结合强度^[51,53-55]。

4 钢及其它基体复合泡沫

钢作为被广泛应用的结构材料，具有良好的强度、硬度、塑性等机械性能，能够承受较大的载荷和应力。将钢作为复合泡沫的基体材料，可以提高整体结构的强度和稳定性，增强材料的抗压和抗变形能力。选择合适填充材料与钢基体复合是为了优化复合泡沫材料的性能，以满足特定的工程需求。通常选用熔点更高的材料，如耐高温陶瓷空心球^[5,56,57]、熔点更高的空心不锈钢球^[58,59]、TiC^[60,61]等，以防止基体材料与填充材料发生反应，并提升复合材料的力学性能(如高强度、高硬度等)、耐久性和可靠性等。

尽管钢基复合泡沫材料的设计和制备经过精心优化，仍可能存在一些缺陷或问题。Mei等^[62]采用低压渗透技术将 Al_2O_3 空心球与ASTMCF-8铸造奥氏体不锈钢基体制备的钢基复合泡沫，观察发现该试样存在部分微孔破裂。如图12所示，试样的最大抗压强度在80 MPa - 100 MPa区间范围，且当应变到23%时会发生破坏。并得出，样品在准静态压缩试验下的变形过程经历了弹性变形、塑性变形和完全破坏三个阶段。Yang等^[56]也做了类似的试验，同样选用ASTMCF-8铸造奥氏体不锈钢作为基体， Al_2O_3 空心球体作为填充材料制备复合泡沫，并详细比较了三种不同尺度($\text{Ø}3.11\text{mm}$ 、 $\text{Ø}3.97\text{ mm}$ 和 $\text{Ø}4.79\text{ mm}$)的 Al_2O_3 空心球制备出的钢基复合泡沫。由图13可以看出，空心球在金属基体中分布均匀，泡沫的胞孔结构均匀，且基体与填充材料之间无明显反应，少部分空心球发生破裂而被钢液浸渗填充。根据表3三种不同密度的MMSF性能比较可以得出，试样的屈服应力最高为66.17 MPa，且当密度为 $3.33\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、致密应变为44.73%时，吸收能量最好，单位体积吸收能量为 $62.74\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。通过上述研究可以发现， Al_2O_3 空心球与钢基体无明显反应，且空心球能够均匀地填充分布形成胞孔结构。Mei等的研究中可能存在填充材料与基体材料之间的界面结合不均匀的问题，这可能是导致微孔破裂等现象产生的原因，从而影响了材料的性能和稳定性。虽然 Al_2O_3 空心球/钢基复合泡沫在适当的制备条件下表现良好，但其制备过程可能需要严格控制，以确保填充材料的分布均匀性和界面结合强度。因此其在制备工艺和界面结合等方面上需要进一步优化。

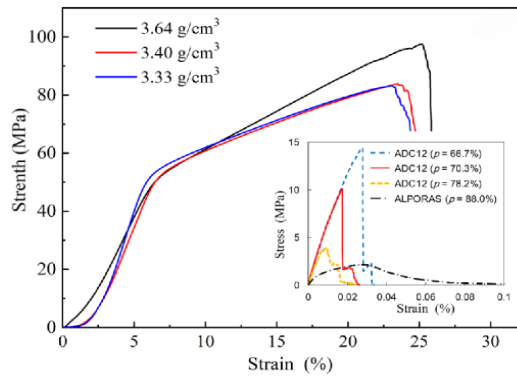


图 3 不同密度的 SSF 准静态压缩下的应力-应变曲线^[62]

Fig. 2 Stress-strain curves under quasi-static compression of SSF at different densities^[62]

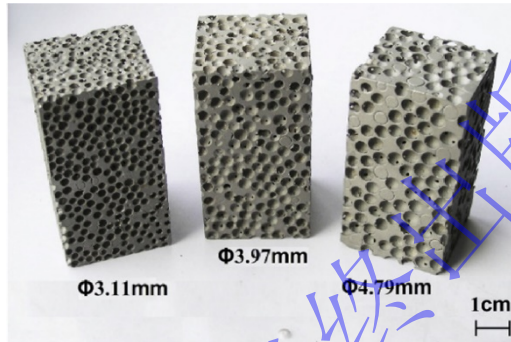


图 4 SSF 泡沫的形态^[56]

Fig. 3 Morphology of SSF foam^[56]

表 3 准静态加载下 MMSF 性能的比较^[56]

Table 3 Comparison of MMSF performance under quasi-static^[56]

金属 基体	空心球直 径(mm)	密度 (g·cm ⁻³)	屈服应 力(MPa)	相对平台 应力 (MPa)	致密应 变(%)	单位体积吸 收能量 (MJ·m ⁻³)	单位质量吸 收能量 (KJ·kg)
CF-8	3.11	3.33	66.17	152.30	44.73	62.74	18.84
CF-8	3.97	3.40	64.53	154.93	41.00	54.67	16.67
CF-8	4.79	3.64	56.77	160.31	40.25	54.47	14.96

此外, Vendra 等^[63]研究了铝基和钢基复合泡沫材料的疲劳行为, 其中用于钢基复合泡沫的空心球由低碳钢(LC)和 316L 不锈钢(SS)制成, 采用粉末冶金技术制备了由 LC 钢球和 LC 钢粉组成的 LC-PM 泡沫和由 SS 球和 SS 粉组成的 SS-PM 泡沫, 并测试了三种 LC-PM 泡沫和四种 SS-PM 泡沫的疲劳耐力极限。如图 14 所示, 箭头所指的个别局部化变形明显看出, SS-PM 泡沫在最大疲劳应力下循环加载时的变形中, 其变形过程并未产生坍塌带, 而是出现了弹性变形、塑性变形和破坏三个阶段的变化。结合上述研究可以看出, 这三个阶段的序列性质表明钢基复合泡沫材料的变形过程比较典型和理想。这种阶段性的变形行为反映了钢基复合泡沫材料的内部结构与外部受力之间的复杂相互作用。虽然在完全破坏阶段样品失效, 但整体来看, 这种弹性-塑性-破坏的变形序列为压缩过程的理想展示, 说明材料具有相对良好的工程性能和韧性。这也为进一步研究和优化钢基复合泡沫材料的制备工艺和性能提供了重要参考和启示。

由表 4 可以看出, SS-PM 和 LC-PM 泡沫的最大平台强度分别为 136 MPa 和 76 MPa。

由此表明，PM 样品在最大疲劳应力下循环加载时，PM 样品表现出良好的塑性行为，而不是发生严重的破坏，且 SS-PM 和 LC-PM 泡沫具有良好的抗变形性能，在受力时能够承受较高的应力，具有较高的强度，是一种优良的复合泡沫材料。他们的研究揭示了这些复合泡沫在长期循环加载下的性能表现，为材料工程领域带来了重要启示。他们的研究发现，铝基和钢基复合泡沫在疲劳加载条件下表现出良好的耐久性能。这意味着即使在经历了长期的循环加载后，这些复合泡沫仍然能够保持较高的结构稳定性和强度。这一发现对于诸如航空航天、汽车制造等领域中需要经受长期循环加载的材料应用具有重要意义。更具体地说，铝基和钢基复合泡沫的良好疲劳行为意味着它们可以被广泛应用于需要耐久性和可靠性的工程结构中。例如，在航空航天领域，这些材料可以用于制造飞机结构件，如机身和机翼，以确保其在长期使用过程中能够承受各种挑战和负载条件。这项研究还为铝基和钢基复合泡沫的进一步优化和改进提供了重要的参考。通过深入理解其疲劳行为，研究人员可以针对其中存在的潜在问题进行改进，进一步提升其在工程领域的应用潜力。

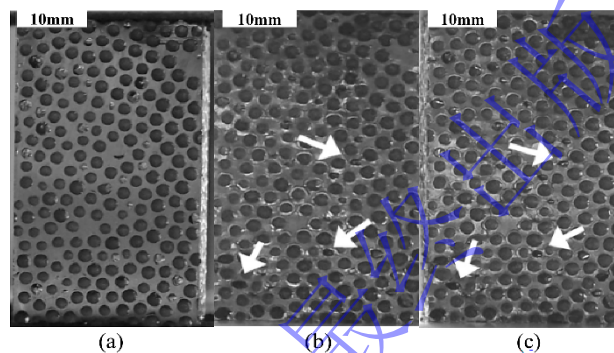


图 5 压力-压缩疲劳载荷(Max=68 MPa)下 2.0 mm 不锈钢 PM 复合泡沫试样循环变形^[63]: (a)未施加循环变形; (b)施加循环变形 850,000 次; (c)施加循环变形 1,083,000 次

Fig. 4 Cyclic deformation of 2.0 mm stainless steel PM composite foam specimen under pressure-compression fatigue loading (Max=68 MPa)^[63]: (a) no cyclic deformation applied; (b) cyclic deformation applied for 850,000 cycles; (c) cyclic deformation applied for 1,083,000 cycles

表 4 钢-钢复合泡沫的力学性能^[63]

Table 4 Mechanical properties of steel-steel composite foam^[63]

样品编号	球体直径 (mm)	相对密度 (%)	平台强度 (MPa)	最大疲劳强度 (MPa)	最大疲劳强度/平台强度 (%)
SS-1	2	37	136	68	50
SS-2	2	37	136	74.8	55
SS-3	2	36	136	81.6	60
SS-4	2	37	136	88.4	65
LC-1	3.7	41	42	30	70
LC-2	1.4	34	76	57	75
LC-3	3.7	41	42	31.7	75

通过以上钢作为基体的复合泡沫的研究可以看出，钢基复合泡沫的抗压强度和吸能能力优于大多数铝、镁基复合泡沫，并且在受力过程都表现出较好的变形状态，但是其密度普遍高于铝、镁基复合泡沫材料，因此钢基复合泡沫的研究还需更进一步。其它纯金属作为基体材料的研究目前也比较少，原因主要包括：（1）制备工艺上存在一定的局限性；（2）制备的样品并未达到预期效果；（3）制备成本较高等。如金属锌，其具有密度较小、熔点较低、良好的延展性和可塑性、耐腐蚀性强、导电导热率较高等优点，有些研究者通

过锌基复合泡沫与其它复合泡沫对比,发现锌合金基复合泡沫具有更高的硬度、抗拉强度、优异的阻尼特性等^[64-67]。但锌为主导的合金有较高的脆性^[68],不利于复合泡沫的抗压破损,且会导致平台应力振荡,不利于复合泡沫的吸能抗震。钛^[69]作为基体制备的陶瓷微球/Ti基复合泡沫材料上未出现明显中间相,压缩试验变形阶段依次为弹性应变阶段、屈服平台阶段和密实化阶段,也具备良好的吸能特性。尽管钛基复合泡沫具有重量轻、良好的强度和刚度,且复合填充材料提供了更大的表面积和更好的吸能能力、耐腐蚀性、隔热性等优点,但与传统钛合金相比,其制备成本相对较高,且导热性能较差,不适用于热量传导的应用。

近年来,还有学者选用综合性能较好的高熵合金研究复合泡沫的制备及相关性能。高熵合金是一种由多种金属元素组成的合金,其具有高度均匀性和相互作用能力,是一种具有优异性能的新型材料^[70]。高熵合金具有出色的力学性能、良好的耐腐蚀性、热稳定性等优异性能,受到当前科学界的广泛关注。因此,以高熵合金作为复合泡沫材料基体是一个新的研究方向,如 Meng 等^[71]报道的采用压力渗透法以 CoCrFeMnNi 高熵合金作为基体,氧化铝空心球作为填充材料制备的复合泡沫,由于 CoCrFeMnNi 的优异韧性和延展性以及氧化铝空心球的强度,使得 CoCrFeMnNi 高熵合金基复合泡沫获得的最高抗压强度为 261.8 MPa,最高吸能能力为 263.4 MJ·m⁻³。而后, Meng 等^[72]进一步研究了该复合泡沫在 196 °C 准静态和动态压缩下的力学性能和变形微观结构。他们发现,196 °C 的准静态压缩下,复合泡沫有较高的孪晶活性和剪切带传播趋势,获得了更高的能量吸收。其抗压强度最高为 500.4 MPa,吸能能力最高为 414.2 MJ·m⁻³。如图 15 所示,在 196 °C 的动态压缩下,其发生了 HCP 相变,基体中形成了纳米层叠双相 (NLDP) FCC/HCP 结构,有效提高了复合泡沫的强度和塑性,其抗压强度最高更是达到了 521.8 MPa。除此之外, Meng 团队^[73]后又制备了氧化铝空心球/AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金基复合泡沫并测试了相关性能。AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金的 FCC/B2 相在压缩变形过程中诱导剪切偏心化和微裂纹,有效提高了复合泡沫的抗压强度和吸能能力。在准静态和动态压缩下,复合泡沫的最高抗压强度分别为 322 MPa 和 483.9 MPa,在 50%应变下,其吸能能力最高为 197.1 MJ·m⁻³。相较于 CoCrFeMnNi 基复合泡沫的吸能能力有所降低,原因是:动态压缩下,样品变形更剧烈、更突然,导致早期致密化,因此,能量吸收效率相对较低。

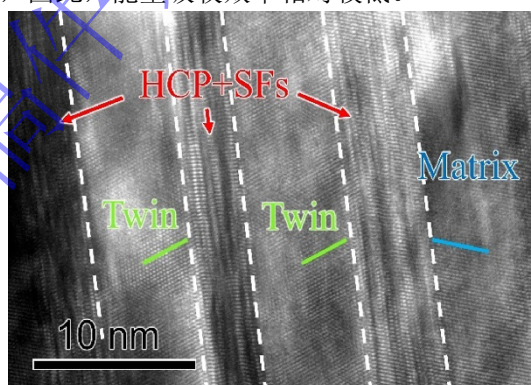


图 15 HRTEM 图像显示了纳米层压双相 FCC/HCP 结构^[72]

Fig. 5 The HRTEM image shows the nano-laminated dual-phase FCC/HCP structure^[72]

目前,有关高熵合金作为基体制备复合泡沫的报道还比较少,但报道中的高熵合金基复合泡沫表现出了优异性能。由于高熵合金内部结构复杂,制备出的复合泡沫微观结构及力学性能等还需要进一步深入研究。并且,还可以研究不同制备工艺等对其性能优化,以适应不同领域的需求。此外,在特殊环境下的性能表现和可靠性也是重要的研究方向,这些研究将促进金属基复合泡沫材料在工程领域的广泛应用。

5 结论

本文总结了近些年有关铝基、镁基和钢基等复合泡沫研究的进展情况，并分类概述了不同基体对产品性能的影响。结果表明，基体材料是金属基复合泡沫的重要组成部分，并直接影响着其结构和性能。目前，铝及其合金具有密度小、强度高、可塑性好等特点，是金属基复合泡沫中应用最广泛的基体材料之一。此外，镁及其合金也有低密度、高强度、延展性好等特点，也是一种重要的金属基体材料。而其它金属，如采用钢、锌、铜、钛等作为基体制备复合泡沫的研究相对较少。并且，在前人的研究中，学者们还发现其它对复合泡沫性能产生影响的因素，如填充材料、制备工艺、孔隙率、界面反应、后处理技术等都对金属基复合泡沫的结构和性能有着很大的影响。此外，随着新型材料的不断推出，金属基复合泡沫的基体材料日趋多样化，需要进一步提高金属基复合泡沫的成型工艺、改善产品性能、降低成本。

高熵合金作为制备金属基复合泡沫基体新材料的研究也开始受到学者的关注。高熵合金凭借其优异的力学性能在金属基复合泡沫的研究中展现出了巨大的潜力，其所制备的复合泡沫相较之前报道的复合泡沫具有更高的抗压强度和吸能能力。但金属基复合泡沫的微观结构和力学性能等特性还受到制备工艺、材料种类等多种因素影响。因此，为了更好地应用这种材料，需要根据不同高熵合金的组分及相关性能，选择合适的填充材料，对高熵合金基复合泡沫的结构和性能做进一步研究。

录用稿件，

非最终出版稿

参考文献

- [1] Li C Y, Chen P F, Mi G F. Effect of base materials and pore grades on mechanical properties of open-cell aluminum foam fabricated by investment casting. *Ferroelectrics*, 2022, 596(1): 95–106.
- [2] Wang Z, Sun X, Zhu M, et al. Effect of enhancement in metal foam pore density on heat transfer of phase-change materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 144: 106750.
- [3] Cui An, Liu F F, Zhang H, et al. Performance analysis and optimization of foam-filled aluminum-alloy corrugated sandwich panel structure for vehicle body. *Automotive Engineering*, 2019, 41(10): 1221-1227.
(崔岸, 刘芳芳, 张晗, 等. 车身泡沫填充铝合金波纹夹芯板结构性能分析与优化. *汽车工程*, 2019, 41(10): 1221-1227.)
- [4] Kádár C, Kubelka P, Szlancsik A. On the compressive properties of aluminum and magnesium syntactic foams: Experiment and simulation. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 106060.
- [5] Weise J, Lehnhus D, Sandfuchs J, et al. Syntactic iron foams' properties tailored by means of case hardening via carburizing or carbonitriding. *Materials*, 2021, 14(16): 4358.
- [6] LI C Y, YANG E K, LI L, et al. Research progress and preparation of closed-cell metal matrix syntactic foams. *Powder Metallurgy Technology*, 2020, 38(5): 383-390.
(历长云, 杨二阔, 李雷, 等. 闭孔金属基复合泡沫材料制备技术研究进展. *粉末冶金技术*, 2020, 38(5): 383–390.)
- [7] Szlancsik A, Katona B, Kemény A, et al. On the filler materials of metal matrix syntactic foams. *Materials*, 2019, 12(12): 2023.
- [8] WU J, JIA F, WANG M M, et al. Preparation and application of metal foams. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2011, 3(3):62-65.
(吴进, 贾芬, 王蒙蒙, 等. 泡沫金属的制备工艺及应用. *精密成形工程*, 2011, 3(3): 62-65+75.)
- [9] Vogiatzis C A, Tsouknidas A, Kountouras D T, et al. Aluminum–ceramic cenospheres syntactic foams produced by powder metallurgy route. *Materials & Design*, 2015, 85: 444–454.
- [10] Liu S, Huang P, Sun X, et al. Fatigue of an aluminum foam sandwich formed by powder metallurgy. *Materials*, 2023, 16(3): 1226.
- [11] Bharathi P, Kumar T S. Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B4C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route. *Silicon*, 2023, 15(10): 4259–4275.
- [12] Awad M, Hassan N M, Kannan S. Mechanical properties of melt infiltration and powder metallurgy fabricated aluminum metal matrix composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, 235(13): 2093–2107.
- [13] Behymer N, Morsi K. Review: closed-cell metallic foams produced via powder metallurgy. *Metals*, 2023, 13(5): 959.
- [14] Su M, Wang H, Hao H. Compressive properties of aluminum matrix syntactic foams prepared by stir casting method. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(8): 1900183.
- [15] Inegbemor A O, Bolu C A, Babalola P O, et al. Aluminum silicon carbide particulate metal matrix composite development via stir casting processing. *silicon*, 2018, 10(2): 343–347.
- [16] Sambathkumar M, Gukendran R, Mohanraj T, et al. A systematic review on the mechanical, tribological, and corrosion properties of Al 7075 metal matrix composites fabricated through stir casting process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, 2023: 1–17.
- [17] Meng J, Huang J, Xu X. Thermophysical properties of Cu-coated carbon fibers reinforced aluminum matrix composites by stir casting. *Carbon Letters*, 2023.
- [18] Mei Y, Fu C, Fu Y, et al. Effect of particle size and distribution of hollow spheres on the compressive behavior of aluminum matrix syntactic foams. *Journal of Materials Research*, 2023, 38(19): 4408–4419.

- [19] S-de-la-Muela A M, Cambronero L E G, Ruiz-Román J M. Molten metal infiltration methods to process metal matrix syntactic foams. *Metals*, 2020, 10(1): 149.
- [20] Orbulov I N. Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration—The effect of infiltration parameters. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 583: 11–19.
- [21] Qu H, Rao D, Cui J, et al. Mg-matrix syntactic foam filled with alumina hollow spheres coated by MgO synthesized with solution coating-sintering. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 2357–2371.
- [22] Szlancsik A, Katona B, Májlíngler K, et al. Compressive behavior and microstructural characteristics of iron hollow sphere filled aluminum matrix syntactic foams. *Materials*, 2015, 8(11): 7926–7937.
- [23] Manakari V, Parande G, Doddamani M, et al. Evaluation of wear resistance of magnesium/glass microballoon syntactic foams for engineering/biomedical applications. *Ceramics International*, 2019, 45(7, Part A): 9302–9305.
- [24] Yang Q, Xu Z, Li L, et al. Microstructure and performance research on ceramic-enhanced Inconel 718 matrix composite using laser additive manufacturing. *Metals*, 2023, 13(9): 1525.
- [25] Zhang B, Lin Y, Li S, et al. Quasi-static and high strain rates compressive behavior of aluminum matrix syntactic foams. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 98: 288–296.
- [26] ZHANG H Y, OUYANG B S, ZHU G J. Research and application of aluminum foam materials. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(1): 69-75.
(张红英, 欧阳八生, 朱国军. 泡沫铝材料的研究与应用. *粉末冶金技术*, 2021, 39(1): 69–75.)
- [27] FAN Q Q, JIANG F C, GUO C H, et al. Investigation on fabrication and properties of hollow spheres/aluminum matrix composite foams. *MATERIALS CHINA*, 2020, (03):248-252.
(范琦琪, 姜凤春, 果春焕, 等. 空心球/铝基复合泡沫材料制备及性能研究. *中国材料进展*, 2020, 39(3): 248–252.)
- [28] Liu J, Qu Q, Liu Y, et al. Compressive properties of Al-Si-SiC composite foams at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 676: 239–244.
- [29] Yin Y, Xu H, Zhao C. Periodically unsteady thermal response of metal-foam solid composite[J]. *Chinese Science Bulletin*, Science China Press, 2016, 61(36): 3964–3972.
- [30] Li Y, Gong L, Xu M, et al. Thermal hydraulic performance of micro-channel heat sink with composite metal foam-solid fin design[J]. *Chinese Science Bulletin*, Science China Press, 2018, 64(2): 215–222.
- [31] Wang Zhanguang, Cai Ping, Li Shuqin. Mechanical properties and energy absorption capability of closed-cell Al foam under uniaxial compression. *Powder Metallurgy Technology*, 2012, 30(4): 274-278,306.
(王展光, 蔡萍, 李书琴. 闭孔胞状泡沫铝的单向压缩力学性能和吸能能力. *粉末冶金技术*, 2012, 30(4): 274-278,306.)
- [32] Huang Z, Hu C, Shen L, et al. Preparation and characterization of light weight aluminum matrix syntactic foams with high energy absorbing capacity. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 872: 144942.
- [33] Kádár C, Máthi K, Knapék M, et al. The effect of matrix composition on the deformation and failure mechanisms in metal matrix syntactic foams during compression. *Materials*, 2017, 10(2): 196.
- [34] Zhang L R. *Preparation and compression properties of magnesium-based composite foam reinforced by in situ autogenous Mg₂Si particles* [Dissertation]. Chang Chun: Jilin University, China, 2009.
(张联仁. 原位自生 Mg₂Si 颗粒增强镁基复合泡沫的制备及压缩性能[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.)
- [35] YANG X D, ZHENG Y X, LI W T, et al. Effect of Si on microstructure and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composite foams. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(1): 186-197.
(杨旭东, 郑远兴, 李威挺, 等. Si 元素对碳纳米管增强铝基复合泡沫组织与性能的影响. *复合材料学*

报, 2021, 38(1): 186–197.)

- [36] Májlinger K, Bozóki B, Kalácska G, et al. Tribological properties of hybrid aluminum matrix syntactic foams. *Tribology International*, 2016, 99: 211–223.
- [37] Katona B, Szlancsik A, Tábi T, et al. Compressive characteristics and low frequency damping of aluminium matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 739: 140–148.
- [38] Katona B, Szabó G, Orbulov I N. Fatigue properties of ceramic hollow sphere filled aluminium matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 679: 350–357.
- [39] Su M, Wang H, Hao H, et al. Compressive properties of expanded glass and alumina hollow spheres hybrid reinforced aluminum matrix syntactic foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 821: 153233.
- [40] Thiyagarajan R, Senthil Kumar M. Enhanced electromagnetic interference shielding effectiveness of an eco-friendly cenosphere-filled aluminum matrix syntactic foam. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(12): 6951–6963.
- [41] Tao X F, Zhang L P, Zhao Y Y. Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres. *Materials & Design*, 2009, 30(7): 2732–2736.
- [42] Zou L C, Zhang Q, Pang B J, et al. Dynamic compressive behavior of aluminum matrix syntactic foam and its multilayer structure. *Materials & Design*, 2013, 45: 555–560.
- [43] Lin Y, Zhang Q, Liu T, et al. Sol-gel MgO coating on glass microspheres for inhibiting excessive interfacial reaction in Al-Mg matrix syntactic foam. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 798: 59–66.
- [44] Maróti J E, Orbulov I N. Characteristic compressive properties of AlSi7Mg matrix syntactic foams reinforced by Al₂O₃ or SiC particles in the matrix. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 869: 144817.
- [45] Orbulov I N, Szlancsik A, Kemény A, et al. Compressive mechanical properties of low-cost, aluminium matrix syntactic foams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 135: 105923.
- [46] Tan J, Ramakrishna S. Applications of Magnesium and its Alloys: A Review. *MATERIALS SCIENCE*, 2021.
- [47] Padnuru Sripathy A, Handjaja C, Manakari V, et al. Development of lightweight magnesium/glass micro balloon syntactic foams using microwave approach with superior thermal and mechanical properties. *Metals*, 2021, 11(5): 827.
- [48] Kubelka P, Kádár C, Jost N. Effect of the interface on the compressive properties of magnesium syntactic foams. *Materials Letters*, 2021, 287: 129293.
- [49] Braszczyńska-Malik K N, Kamiński J. AZ91 magnesium matrix foam composites with fly ash cenospheres fabricated by negative pressure infiltration technique. *Materials Characterization*, 2017, 128: 209–216.
- [50] Li C Y, Yang E K, Tang L, et al. Compression properties and fabrication of closed-cell metal matrix syntactic foams Al₂O₃/AZ91D. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 15(19): 6873.
- [51] Akinwekomi A D, Law W C, Choy M T, et al. Processing and characterisation of carbon nanotube-reinforced magnesium alloy composite foams by rapid microwave sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 726: 82–92.
- [52] Xia X, Feng J, Ding J, et al. Fabrication and characterization of closed-cell magnesium-based composite foams. *Materials & Design*, 2015, 74: 36–43.
- [53] Dong Z Q. *Research on the mechanical behavior of volcanic rock particle/magnesium composite foam and its sandwich structure* [Dissertation]. Chang Chun: Jilin University, 2023.
(董智强. 火山岩颗粒/镁复合泡沫及其夹芯结构的力学行为研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.)
- [54] Azizieh M, Pourmansouri R, Balak Z, et al. The application of friction stir processing to the fabrication of magnesium-based foams. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62(4): 1957–1962.
- [55] Shi S, Sun W, Zhang X, et al. Compressive property and energy absorption capacity of Mg-ceramic-Ni foams at various temperatures. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 12(4): 689.

- [56] Yang Q, Cheng J, Wei Y, et al. Innovative compound casting technology and mechanical properties of steel matrix syntactic foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 156572.
- [57] Yang Q, Yu B, Hu H, et al. Melt flow and solidification during infiltration in making steel matrix syntactic foams. *Materials Science and Technology*, 2019, 35(15): 1831–1839.
- [58] Amofo-Yeboah N, Rabiei A. Thermal response of steel–steel composite metal foams under small-scale torch-fire conditions. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(19): 2300217.
- [59] Sazegaran H, Kiani-Rashid A-R, Khaki J V. Effects of sphere size on the microstructure and mechanical properties of ductile iron–steel hollow sphere syntactic foams. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2016, 23(6): 676–682.
- [60] Gao W, Zhou Y, Wu S, et al. Preparation, microstructure and mechanical properties of steel matrix composites reinforced by a 3D network TiC ceramics. *Ceramics International*, 2022, 48(14): 20848–20857.
- [61] Bakan H I, Korkmaz K. Synthesis and properties of metal matrix composite foams based on austenitic stainless steels –titanium carbonitrides. *Materials & Design*, 2015, 83: 154–158.
- [62] Mei Y, Fu C, Fu Y, et al. Tensile behavior and performance of syntactic steel foams prepared by infiltration casting. *Metals*, 2022, 12(4): 668.
- [63] Vendra L, Neville B, Rabiei A. Fatigue in aluminum–steel and steel–steel composite foams. *Materials Science and Engineering A*, 2009.
- [64] Liu J A. *Preparation and properties of ceramic/ZA22 composite foam*. [Dissertation]. Chang Chun: Jilin University, China, 2009.
(刘家安. 陶瓷/ZA22 复合泡沫的制备及性能研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.)
- [65] Kumar Yadav S, Karuna Kumar G, Vijaya Prakash R. Preparation and characterization of ZA27-alumina-graphite reinforced hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 57–65.
- [66] Linul E, Lell D, Movahedi N, et al. Compressive properties of zinc syntactic foams at elevated temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 167: 122–134.
- [67] Broxtermann S, Vesenjok M, Krstulović-Opara L, et al. Quasi static and dynamic compression of zinc syntactic foams[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 768: 962–969.
- [68] Al-Sahlani K, Kisi E, Fiedler T. Impact of particle strength and matrix ductility on the deformation mechanism of metallic syntactic foam. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 786: 292–299.
- [69] Xue X, Zhao Y. Ti matrix syntactic foam fabricated by powder metallurgy: Particle breakage and elastic modulus. *JOM*, 2011, 63(2): 43–47.
- [70] George E P, Raabe D, Ritchie R O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, 4(8): 515–534.
- [71] Meng J, Liu T-W, Wang H Y, et al. Ultra-high energy absorption high-entropy alloy syntactic foam. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 207: 108563.
- [72] Meng J, Qiao Y, Chen Y, et al. A high-entropy alloy syntactic foam with exceptional cryogenic and dynamic properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 876: 145146.
- [73] Meng J, Qiao Y, Liu T W, et al. Eutectic high entropy alloy syntactic foam. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 149: 177–189.