

泡沫锌制备与压缩性能研究进展

张宇¹, 王莹玉¹, 孙伟博¹, 孙广志¹, 刘家安^{1, 2}

(1. 吉林大学材料科学与工程学院, 吉林长春130025;
2. 吉林大学汽车材料教育部重点实验室, 吉林长春130025)

摘要: 泡沫锌是一种结构功能一体化的重要工程材料, 在交通运输、机电仪表和生物医学等领域均有广泛的应用前景。泡沫锌的性质取决于化学组成、微观组织和宏观孔结构等, 这些因素均受到制备技术的影响。为了深入认识泡沫锌的制备技术-宏(微)观结构-压缩性能之间的联系, 本文结合国内外研究文献, 首先介绍了泡沫锌的制备工艺, 梳理了关键技术上的发展趋势, 阐述了工艺参数对孔结构特征的影响及机理; 其次, 总结了泡沫锌压缩性能的研究现状, 从基体性质、孔结构和测试条件等多角度分析了压缩性能的主要影响因素, 并探讨了泡沫锌的应变率效应问题。最后, 阐述了实现泡沫锌高性能化的有效途径, 展望了泡沫锌研究的未来发展。

关键词: 泡沫金属; 锌; 制备技术; 压缩性能

泡沫金属是一种由金属相和气相组成的轻质材料, 兼具结构功能一体化特性^[1-3]。泡沫锌不仅具有优良的缓冲吸能性, 而且还具有阻尼、吸声和生物相容等功能性, 可用于高速公路声屏障、仪器仪表的阻尼减振元件和人工植入体支架等, 在交通运输、机电仪表和生物医学等领域的应用潜力巨大^[4-8]。

泡沫金属在工程应用中需承受压缩载荷的作用, 在大应变范围内发生塑性变形, 在此过程中保持低水平应力状态, 吸收大量的塑性变形能量。压缩性能作为泡沫锌的主要力学性能之一, 是其在实际应用中进行结构设计的重要评定指标^[1-2]。泡沫锌的高性能化依赖于良好的宏观孔结构和微观组织结构, 孔的类型、孔隙率、相对密度、孔径、形态、分布和表面积等宏观孔结构特征和化学成分、物相组成和晶粒尺寸等微观结构特征又与制备工艺密切相关。对制备工艺中的关键环节的深入系统研发有助于调控孔结构、优化微观组织和获得高品质的泡沫锌^[9-11]。

目前, 提升泡沫锌压缩性能的主要手段是通过制备技术的系统研究来优化工艺参数, 达到控制泡沫锌的宏观孔结构和微观组织结构的目标。为了深入认识泡沫锌的制备技术-宏(微)观结构-压缩性能之间的联系, 本文介绍了泡沫锌的主要制备技术及其关键工艺流程的国内外研发概况, 总结了泡沫锌压缩性能的研究现状及发展趋势, 分析了压缩性能的主要影响因素, 为泡沫锌的高性能化提供经验, 促进泡沫锌的深入研究, 推动其进一步工程化应用。

1 制备技术

泡沫锌的孔结构可通过工艺进行调控。按照孔的形态及分布, 泡沫锌主要分为闭孔泡沫锌、开孔泡沫锌和复合孔(合成孔)泡沫锌三种类型, 可以通过不同的制备技术获得。

1.1 闭孔泡沫锌

闭孔泡沫锌是由金属锌和气孔组成, 气孔之间不连通, 孤立封闭, 具有金属基

作者简介:

张宇(2002-), 男, 硕士生, 主要从事泡沫金属的研究。E-mail: 2278319973@qq.com

通信作者:

刘家安, 男, 教授。E-mail: liuja@jlu.edu.cn

中图分类号: TG146.1⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)07-0960-07

收稿日期:

2025-01-07 收到初稿,
2025-04-01 收到修订稿。

体相连续和气相不连续的结构特征。闭孔结构可采用熔体发泡、粉末冶金发泡、气体注入发泡和固-气共晶凝固等成形技术制备,其中熔体发泡技术和粉末冶金发泡技术是制备闭孔泡沫锌的主要方法。

熔体发泡技术是在液态金属中产生多孔结构的常用方法,以固态金属锌、发泡剂和增粘剂作为主要原料^[2],其工艺过程是加热使金属锌熔化,然后在熔融的液态锌中加入固体增粘物质,提高液态金属的粘度,在增粘的液态锌中加入发泡剂,搅拌使发泡剂均匀分散在熔体中。随后,提高温度使发泡剂释放出气体,体积膨胀,待泡沫熔体凝固后,获得闭孔结构的泡沫锌。通过控制发泡剂的种类和含量,增粘剂的含量以及加热温度和时间等工艺参数,可以制备出不同孔结构和微观组织的泡沫锌。

金属熔体的泡沫化包含着气相、液相和固相的混合和分离,其中的气体产生溶解、析出、排液和聚合等一系列现象,是一个复杂的冶金过程。国内外学者在熔体增粘剂开发及泡沫稳定机理、发泡剂的开发及发泡动力学方面做了很多研究。在增粘方面,先后采用了钙颗粒、碳化硅颗粒和氧化铝短纤维作为熔体增粘剂使用^[4, 11],发现熔体增粘剂在泡沫化过程中主要起减缓排液并阻碍气泡聚合的作用^[2],短纤维的增粘效果好,这归因于纤维的高长径比和高比表面积使熔体粘度更高,使熔体泡沫更稳定,体积膨胀率高。在发泡剂方面,研究发现,发泡剂的种类和含量可改变泡沫锌的孔结构,发泡剂应该有适合的分解温度,否则会造成局部缺陷。除了常用的发泡剂,如氢化钛和碳酸钙外^[1, 4],新型发泡剂的研究不断涌现。Mondal等采用 CaH_2 做为新型发泡剂,研究ZA27闭孔泡沫的发泡行为^[12]。研究表明, CaH_2 适合高孔隙率泡沫锌的制备。如图1-图3^[12]所示, CaH_2 含量增加,闭孔泡沫锌的孔径略微增大,孔壁厚度从220 μm 降低至80 μm ,相对密度可从0.22降至0.05,孔隙率可到94%左右。以上结果说明,通过控制发泡剂的分解温度及含量,有效调整了泡沫锌的孔径、孔壁厚度、相对密度和孔隙率。

粉末冶金发泡技术是通过粉末烧结过程获得多孔

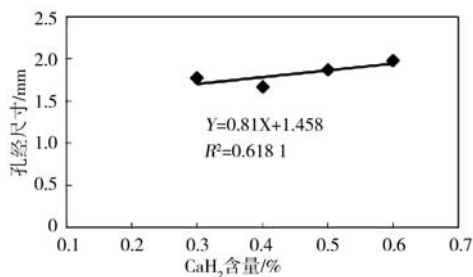


图1 孔径尺寸与 CaH_2 含量关系

Fig. 1 The relationship between pore size and CaH_2 content

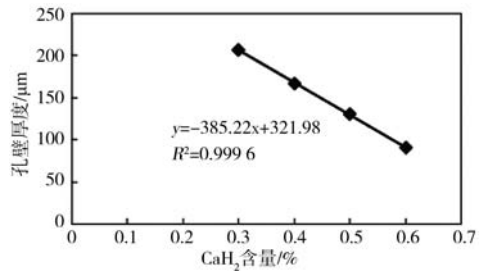


图2 孔壁厚度与 CaH_2 含量的关系

Fig. 2 The relationship between pore wall thickness and CaH_2 content

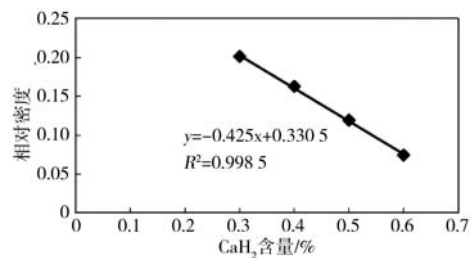


图3 相对密度与 CaH_2 含量的关系

Fig. 3 The relationship between relative density and CaH_2 content

结构的常用方法,以固态锌粉和发泡剂为主要原料^[3]。粉末冶金发泡法的工艺流程主要包括粉末和发泡剂混合,压制成形,高温烧结和冷却等步骤。首先,将金属粉末与发泡剂粉末在球磨机中均匀混合,然后在一定压力下压成预制块。随后,将预制块放入加热炉中,升高温度使发泡剂分解产生气体,预制块开始膨胀,最后冷却形成多孔结构。在增粘机理方面,国内外的研究者发现,由于金属粉末表面含有的氧化膜,在发泡过程中起到增粘和稳定泡沫的作用^[2, 13],因此粉末发泡过程中一般无需外加增粘物质。在发泡动力学方面,粉末冶金过程要求发泡剂有合适的分解温度和气体释放速率。为此,Mukherjee等采用含氢的预合金化AlMg50粉末代替传统发泡剂 TiH_2 粉末^[14]。

1.2 开孔泡沫锌

开孔泡沫锌又称通孔泡沫锌,主要由锌合金与气孔构成,孔结构三维贯通,孔与孔之间通过小尺寸的开孔连接,具有金属基体相连续、气相连续的结构特征。开孔结构可采用熔体浸渗技术和增材制造技术等方法获得。

熔体浸渗技术是在多孔预制体中渗入金属熔体后,去除预制体并获得开孔泡沫金属的工艺方法^[2]。工艺流程主要包括预制体的成形阶段、金属渗流阶段和预制体的去除阶段。当预制体的造型材料为盐颗粒和树脂砂时,去除预制体后留下气相的连续结构与预制体的三维结构相近,又称为渗流铸造工艺;当采用高分子聚氨酯泡沫作为预制体造型时,去除预制体后

留下金属相的连续结构与预制体的三维结构相近, 又称为熔模铸造工艺。按照金属渗流阶段施加压力的类型可分为离心浸渗、气压浸渗、负压浸渗和正压浸渗等。国内外学者在金属浸渗预制体过程的预制体堆积密度、渗流温度、时间和压力等工艺参数的研究方面做了大量基础工作。Sánchez等研究了预制体颗粒的尺寸和金属渗流压力等工艺参数对开孔Zn-22Al-2Cu泡沫的结构特征的影响规律^[15], 如表1所示, 通过调控预制体颗粒尺寸, 可使泡沫锌的孔径分别达到0.42 mm、0.65 mm和0.85 mm; 并且最小压力与孔径有一定对应关系, 分别为25 N、16 N和11 N。Hou等研究了盐颗粒预制体的堆积密度对纯Zn和Zn-3Cu开孔泡沫的孔结构的影响^[16]。结果表明, 盐颗粒的高堆积密度使泡沫锌的孔隙率达到75%左右, 孔径增大, 比表面积减小。

表1 不同孔径的最佳渗流参数

Tab. 1 The best seepage parameters of different apertures

样品孔径 大小/mm	离心力 F/N	浸渗压 P/kPa	预热温度 $T_{\text{pret}}/^{\circ}\text{C}$	浇注温度 $T_{\text{pouring}}/^{\circ}\text{C}$
(A) 0.85	11	0.61	500	600
(B) 0.65	16	0.94	550	600
(C) 0.42	25	1.42	600	600

增材制造技术是使用金属粉体和丝材等原材料逐层累积获得开孔泡沫金属结构的一种方法, 通常也称为3D打印技术。该工艺将CAD/CAM结构设计技术、计算机数值模拟技术与多种能量源(激光、电子束和等离子体等)成形技术相结合, 快速精密地制造出复杂形状的三维多孔结构, 达到了多自由度制造的效果。研究发现, 锌的增材制造存在一些问题^[9, 17]: 由于锌及其合金的熔点(420 $^{\circ}\text{C}$ 左右)和沸点(907 $^{\circ}\text{C}$ 左右)低, 很容易发生氧化和蒸发, 导致多孔锌支架出现大量的结构缺陷。为此, 国内外学者开展了技术攻关。Wen等设计了一种特殊的气流循环系统用于消除锌蒸发对成形质量的负面作用^[18]。基于计算流体动力学, 模拟了屏蔽气流的速度分布、气流与蒸发烟气之间的相互作用, 优化保护气体流量和激光能量输入, 金属蒸汽被有效地吹出。制备的开孔锌支架表面覆盖许多颗粒, 采用化学加电化学抛光技术可去除颗粒附着物, 获得均匀光滑表面。

1.3 复合泡沫锌

复合泡沫锌也称合成泡沫锌, 由金属锌合金与多孔固体颗粒组成, 具有金属基体相连续, 而多孔颗粒不连续的结构特征。多孔固体颗粒内部的孔隙之间既有孤立封闭的, 也有相互连通的, 形态多样。复合泡

沫锌的制备技术主要有渗流铸造法、熔体搅拌法和粉末冶金法等^[19]。渗流铸造法的复合泡沫锌中多孔颗粒体积分数高。

复合泡沫锌中的多孔颗粒的密度和孔隙类型决定了复合泡沫的整体密度和孔隙率。另外, 高温制备过程中, 多孔颗粒的化学性质又是与锌合金发生潜在界面反应的重要因素。因此, 多孔固体颗粒的结构和性质对复合泡沫锌的品质十分关键。一般常用的多孔颗粒有粉煤灰漂珠、玻化微珠和蛭石等。为了提高复合泡沫锌的孔隙率, 达到高比强度的目标, 国内外学者在多孔颗粒的选材和泡沫锌的成形质量方面做了很多尝试。Weise等以玻化微珠为多孔颗粒制备了复合泡沫锌, 密度范围为2.6~3.0 g/cm^3 ^[20]。为了使复合泡沫锌进一步轻量化, Movahedi等选用膨胀珍珠岩作为新型多孔颗粒, 通过多孔颗粒的含量调控复合泡沫的密度, 密度最低能达到1.78 g/cm^3 ^[21]。

2 压缩性能

衡量泡沫金属压缩性能的参数主要有屈服应力、平台应力、致密化应变、弹性模量、能量吸收能力及能量吸收效率等, 其中屈服应力、平台应力和能量吸收能力是主要的衡量指标。泡沫金属的力学理论认为^[3], 影响泡沫金属压缩性能的因素众多, 可分为内在因素和外在因素。内在因素分两大类: 一类为孔结构, 如孔隙率水平、相对密度、孔径尺寸、孔形状及分布等; 另一类为基体材料的性质, 如材料的化学成分、相组成和微观组织形貌等。外在因素主要指测试条件, 包括应变速率(加载速率)、测试温度和介质环境等。国内外关于泡沫锌的压缩性能研究大多集中于上述因素的影响规律及机理。本文按照内外因素的顺序, 主要总结孔隙率、相对密度、孔径尺寸、材料成分、微观组织和应变速率等方面的国内外研究成果。

2.1 闭孔泡沫锌

由于泡沫金属的结构特点, 其变形行为不同于致密的实体金属, 在一定的尺度内, 力学响应过程不能以连续介质力学理论来支持。独特的结构特征和变形特点使泡沫金属的压缩曲线包含了线弹性阶段、平台阶段和密实化阶段。

在孔结构方面, 国内外学者研究了孔隙率、相对密度和孔径等因素对压缩性能的影响规律。Sahu等研究了不同孔径和相对密度的闭孔ZA27泡沫的压缩性能^[22]。结果表明, 平台应力随相对密度的升高而增大, 随着孔径尺寸增加而略微降低。在温度为100 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率为0.01 s^{-1} 的测试条件下, 当相对密度从0.64增加到0.77, 平台应力从3.64 MPa提高到5.45 MPa。而当

孔径增加24%时,平台应力仅降低5.5%。此外,Cruz-Ramírez等使用BaSO₄做增粘剂制备了Zn-22Al-2Cu泡沫,研究了增粘剂含量-孔隙率-压缩性能之间的联系^[23]。发现当BaSO₄由0.5 wt.%增加到1.5 wt.%时,孔隙率由89.94%降低到81.80%,平台应力由0.69 MPa增加到10.07 MPa。

在基体性质方面,改变材料成分和微观组织,通过孔壁的力学性能的变化,可以改变压缩性能。目前开发了多种成分的泡沫锌,主要有纯锌、锌铝合金和锌铜合金等系列,其中锌铝合金泡沫的研究较多,如Zn-5Al(ZA5),Zn-22Al(ZA22),Zn-27Al(ZA27)体系的泡沫^[7-12]。铝是锌的有益合金化元素,能够发挥多种强化机制的综合作用提升力学性能,因此锌铝合金泡沫的压缩强度远高于纯锌合金泡沫。锌铝合金泡沫中,细化微观组织能显著提高孔壁的力学性能。Kitazono等的研究发现,Zn-22Al合金泡沫在室温下表现出良好的塑性变形^[10]。经过热处理的合金泡沫的孔壁微观组织具有细小等轴晶粒,压缩强度提高。当孔隙率为59%时,能量吸收能力达到10.2 MJ/m³^[24]。

在加载速率方面,围绕着泡沫锌的应变率效应及其机理,目前的研究均证实了应变速率对泡沫锌的作用。研究发现,Zn-27Al合金泡沫的应变速率敏感指数为0.074~0.062 3^[22]。另外,如图4的研究表明,实体Zn-22Al合金的应变率敏感性指数 $m=0.1$;Zn-22Al泡沫的应变率敏感指数为0.14,是Alporas泡沫的3.7倍($m=0.038$)^[10]。试验结果证明Zn-22Al合金泡沫的屈服应力随应变速率增加而增大,主要归因于孔壁的高应变率敏感指数,表现出明显的应变率效应。

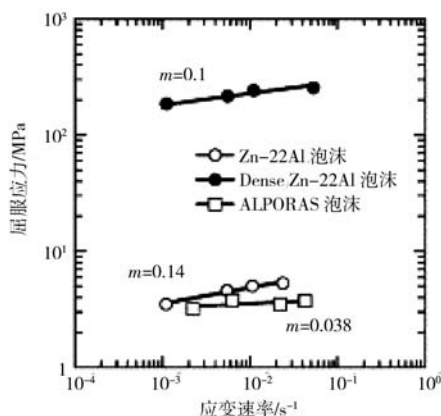


图4 Zn-22Al泡沫、实体Zn-22Al合金和ALPORAS泡沫的屈服应力与应变速率的关系

Fig. 4 The relationships between yield stresses and strain rates of Zn-22Al foam, solid Zn-22Al alloy and ALPORAS foam

2.2 开孔泡沫锌

对于开孔泡沫锌的压缩性能,孔隙率和孔径是孔

结构特征参数中研究较多的因素。Li等研究了不同孔隙率(55%~67%)的开孔泡沫锌的压缩性能^[25]。当孔隙率从55.6%升高到66.5%时,压缩强度由13.13 MPa降低到6.03 MPa。Casolco等制备了开孔Zn-22Al-1Cu泡沫,孔隙率为52%~64%,孔径为2~7 mm^[26]。研究发现,压缩性能与孔径和孔隙率密切相关,小孔径和低孔隙率可以获得高强度。Wang等研究了孔隙率和单元体尺寸对Zn-2Mg多孔支架的力学性能的影响^[27]。结果表明,当单元体尺寸相同时,强度随着孔隙率的增加而显著降低。孔隙率为40%的多孔锌支架的强度是孔隙率为80%时的15.7倍。而在孔隙率相同的情况下,强度随着单元体尺寸的增加而略有下降。

在基体性质研究方面,国内外研究发现,稀土元素对泡沫锌力学性能有提升作用。王海滨等研究了稀土La和Ce的添加量对开孔Zn-22Al泡沫组织和性能的影响^[28]。结果发现,适量的稀土元素抑制了晶粒长大,使泡沫基体的微观组织得到细化。Qin等采用激光增材制造技术制备了纯锌和Zn-5WE43多孔支架^[29]。通过添加不同含量的WE43,实现了微观组织和力学性能的调控。结果表明,成形过程中快速冷却速度和WE43的加入共同作用细化了多孔支架的微观组织。随着WE43含量增加,Zn+Mg₂Zn₁₁共晶增加,Zn-5WE43多孔支架的强度为73.2 MPa,而纯锌多孔支架的强度为22.9 MPa,提升效果显著。

在加载速率方面,刘晓倩研究了Zn和Zn-5Al开孔泡沫锌在不同应变速率条件下的压缩性能^[30]。结果发现,随着应变速率增加,两种泡沫锌的压缩强度均提高;Zn和Zn-5Al开孔泡沫锌的应变率敏感指数分别为0.358和0.161,具有明显的应变率效应。

2.3 复合泡沫锌

由于多孔固体颗粒的引入,复合泡沫锌的压缩性能的影响因素更为复杂。各国学者在孔隙率、多孔颗粒的类型、颗粒尺寸、基体性质、界面和加载速率等方面,从多角度研究了复合泡沫锌的压缩性能与影响因素的内在联系。

在孔结构方面,Daoud等选用空心玻化微珠制备了Zn-22Al复合泡沫,其中空心微珠的体积含量范围为6%~50%^[31]。如图5所示,在应变速率为 $4.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下,当微珠含量从6%增加到20%时,压缩强度增加;当微球含量从20%增加到50%时,压缩强度降低。在应变速率为 $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 条件下,随着微珠含量从5%增加到50%时,复合泡沫的压缩强度降低。Movahedi等选用Zn-27Al合金和软木颗粒制备了复合泡沫锌。压缩测试试验发现,在相对密度为40.1%~45.0%时,复合泡沫锌的压缩强度由26.73 MPa

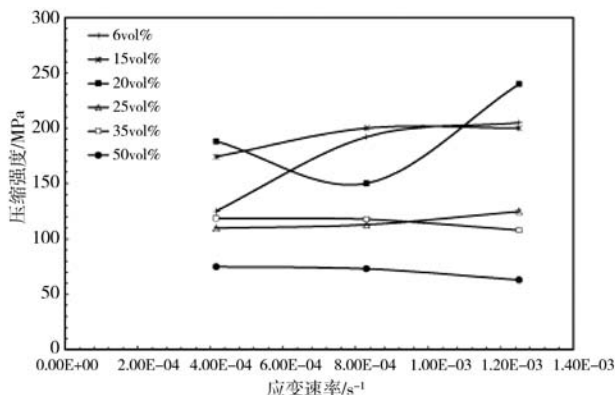


图5 复合泡沫的压缩强度与应变速率的关系

Fig. 5 The relationships between compressive strengths and strain rates of composite foams

增加到37.75 MPa^[32]。

在多孔颗粒的性质方面, Hassein-Bey等采用膨胀珍珠岩和锌合金制备复合泡沫锌, 发现膨胀珍珠岩在与锌合金基体高温复合过程中会形成紧密结合, 抑制孔壁的氧化和裂纹扩展, 显著提升了复合泡沫的压缩强度^[33]。Broxtermann等分别选用膨胀珍珠岩和膨胀玻璃微珠, 制备了两种复合泡沫锌, 并比较了压缩性能^[34]。结果发现, 无论是在准静态还是在动态载荷条件下, 膨胀珍珠岩复合泡沫锌比膨胀玻璃微珠复合泡沫锌的强度更高。比如, 在准静态压缩条件下, 膨胀珍珠岩复合泡沫锌和膨胀玻璃微珠复合泡沫锌的平台应力分别为57.27 MPa和67.65 MPa。

在基体性质方面, Movahedi等研究了热处理对膨胀珍珠岩颗粒/Zn-27Al复合泡沫的微观组织和力学性能的影响, 并探讨了相关机理^[21]。结果发现, 热处理使孔棱的微观结构由枝晶组织转变为球化组织, 增加了孔棱的塑性, 使复合泡沫的变形机制由脆性断裂和宏观剪切带转变为韧性变形。当密度为1.78 g/cm³时, 铸态的复合泡沫的平台应力约为26 MPa, 而热处理态的复合泡沫的平台应力约为61 MPa。

在加载速率方面, Daoud等选用空心玻化微珠制备了Zn-22Al复合泡沫^[31]。压缩试验表明, 当微珠体积含量低于25%时, 复合泡沫的压缩强度随应变速率增加而升高。而当微珠体积含量为35%和50%时, 复合泡沫的压缩强度则随应变速率升高而降低。Movahedi等采用膨胀珍珠岩 (EP) 和活性炭 (AC) 颗粒制备了ZA27复合泡沫锌^[35]。在0.2 mm·s⁻¹ (准静态) 或284 mm·s⁻¹ (动态) 的条件下, 测试了复合泡沫锌的压缩性能, 结果发现, 由于ZA27合金的负应变率敏感性, 变形速度增加会降低合金基体的强度。在高加载速率时,

ZA27-EP泡沫的强度降低; 而ZA27-AC泡沫的强度则没有明显变化, 这主要是由于活性炭颗粒抑制了合金基体的负应变率效应。以上研究说明, 合金体系、多孔颗粒的性质和孔结构等因素均影响了复合泡沫锌的应变率效应。

3 结语

泡沫锌的结构功能一体化特性使其在众多工程领域均有良好的应用潜力。关于闭孔泡沫锌、开孔泡沫锌和复合泡沫锌的制备技术及压缩性能, 国内外进行了大量研究, 本文介绍了制备技术的关键环节及其研究概况, 从孔结构特征、基体性质和加载速率等方面总结和分析了影响压缩性能的主要因素。尽管泡沫锌的相关研究已经取得了一些成果, 但对其中的科学问题和关键技术的认识仍有待深入, 需要开展以下工作:

(1) 泡沫锌中孔结构/微观组织的调控机理的系统研究。对于闭孔泡沫锌, 孔结构的缺陷问题仍然面临着挑战, 需要开展对发泡过程中的气泡形核、生长和聚合等现象的热力学和动力学原理研究。对于开孔泡沫锌, 微观组织的一致性和可控性仍有待提高, 需要深入认识孔结构成形过程中微观组织的演化和偏析形成规律等冶金学原理。对于复合泡沫锌, 整体孔隙率仍偏低, 密度偏高, 需要开发轻质高强的多孔颗粒, 并系统研究锌基体与多孔颗粒在高温下复合过程的交互作用机理。探索制备工艺与结构/材料的对应关系, 加强泡沫锌的宏观孔结构/微观组织的可设计性。

(2) 泡沫锌压缩性能的构效关系的深入研究。目前的研究较多针对单因素对压缩性能的影响规律方面, 综合考虑多因素的作用机理方面仍不充分。关于泡沫锌应变率效应的机理没有一致结论, 还建立在唯象的本构力学分析层面。很多研究是从材料力学的角度分析泡沫锌的强化机制, 需要从结构力学的角度深入探索孔结构在加载过程中的变形行为, 引入计算机图像技术及数值模拟技术分析失效机理, 建立结构/材料与压缩性能的精确模型, 以期实现泡沫锌的高性能化。

总之, 泡沫锌的制备技术和压缩性能的研究涉及到力学、材料学和计算机科学等多学科交叉, 开展深入的科研工作不但实现多学科融合, 还会跨领域出现研究成果, 有利于综合评价泡沫锌的性能和应用领域, 进一步促进泡沫锌的工程化应用。

参考文献:

- [1] BANHART J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams [J]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 559–632.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structures and properties [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1997: 1–11.
- [3] DEGISCHER H. P. Handbook of cellular metals [M]. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- [4] LIU J A, YU S R, HU Z Q, et al. Deformation and energy absorption characteristic of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zn-Al}$ composite foams during compression [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 506: 620–625.
- [5] LIU Z, LIU X, QIAO A, et al. Mechanical properties and in vitro corrosion of biodegradable open-cell Zn alloy foams [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32: 5221–5236.
- [6] WEI J N, LI Z B, HAN F S. Damping behavior and mechanism of foamed Zn-Al eutectoid alloy [J]. Physics Status Solidi A, 2002, 191: 435–444.
- [7] MOSTAED E, SIKORA-JASINSKA M, MOSTAED A, et al. Novel Zn-based alloys for biodegradable stent applications: design, development and in vitro degradation [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 60: 581–602.
- [8] ORIŇAKOVÁR, GOREJOVÁR, KRÁLOVÁZ O, et al. Novel trends and recent progress on preparation methods of biodegradable metallic foams for biomedicine: a review [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56: 13925–13963.
- [9] LIU J, WANG D, LIU B, et al. Microstructural evolution, mechanical properties and corrosion mechanisms of additively manufactured biodegradable Zn-Cu alloys [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2024, 186: 142–157.
- [10] KITAZONO K, TAKIGUCHI Y. Strain rate sensitivity and energy absorption of Zn-22Al foams [J]. Scripta Materialia, 2006, 55: 501–504.
- [11] LIU J, YU S, ZHU X, et al. Correlation between ceramic additions and compressive properties of Zn-22Al matrix composite foams [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 476: 220–225.
- [12] MONDAL D P, GOEL M D, BAGDE N, et al. Closed cell ZA27-SiC foam made through stir-casting technique [J]. Materials and Design, 2014, 57: 315–324.
- [13] CHETHAN A, GARCIA-MORENO F, WANDERKA N, et al. Influence of oxides on the stability of zinc foam [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46: 7806–7814.
- [14] MUKHERJEE M, GARCIA MORENO F, JIMÉNEZ C, et al. Al and Zn foams blown by an intrinsic gas source [J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 12 (6) : 472–477.
- [15] SÁNCHEZ-MARTÍNEZ A, CRUZ A, GONZÁLEZ-NAVA M, et al. Main process parameters for manufacturing open-cell Zn-22Al-2Cu foams by the centrifugal infiltration route and mechanical properties [J]. Materials and Design, 2016, 108: 494–500.
- [16] HOU Y, JIA G, YUE R, et al. Synthesis of biodegradable Zn-based scaffolds using NaCl templates: relationship between porosity, compressive properties and degradation behavior [J]. Materials Characterization, 2018, 137: 162–169.
- [17] LI Y, PAVANRAM P, ZHOU J, et al. Additively manufactured functionally graded biodegradable porous zinc [J]. Biomaterials Science, 2020, 8: 2404–2419.
- [18] WEN P, QIN Y, CHEN Y, et al. Laser additive manufacturing of Zn porous scaffolds: Shielding gas flow, surface quality and densification [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35: 368–376.
- [19] AFOLABI L O, ARIFF Z M, HASHIM S F S, et al. Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9: 10698–10718.
- [20] WEISE J, YEZERSKA O, BUSSE M, et al. Production and properties of micro-porous glass bubble zinc and aluminium composites [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2007, 38: 901–906.
- [21] MOVAHEDI N, MURCH G E, BELOVA I V, et al. Effect of heat treatment on the compressive behavior of zinc alloy ZA27 syntactic foam [J]. Materials, 2019, 12: 792.
- [22] SAHU S, GOEL M D, MONDAL D P, et al. High temperature compressive deformation behavior of ZA27-SiC foam [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 607: 162–172.
- [23] CRUZ-RAMÍREZ A, CONTRERAS-HERNÁNDEZ I, COLIN-GARCÍA E, et al. Performance assessment on the manufacturing of Zn-22Al-2Cu alloy foams using barite by melt route [J]. Crystals, 2024, 14 (10) : 872.
- [24] KITAZONO K, SEO T, TAKIGUCHI Y. Room temperature superplastic deformation of closed-cell zinc alloy foams [J]. Materials Science Forum, 2007, 561: 1715–1718.
- [25] LI Z, ZHANG X, HUANG P, et al. Preparation and properties of open-cell zinc foams as human bone substitute material [J]. China Foundry, 2019, 16: 414–422.
- [26] CASOLCO S R, DOMINGUEZ G, SANDOVAL D, et al. Processing and mechanical behavior of Zn-Al-Cu porous alloys [J]. Materials

- Science and Engineering A, 2007, 471: 28–33.
- [27] WANG X, LIU A, ZHANG Z, et al. Additively manufactured Zn-2Mg alloy porous scaffolds with customizable biodegradable performance and enhanced osteogenic ability [J]. *Advanced Science*, 2024, 11: 2307329.
- [28] 王海滨, 梁淑华. 稀土对泡沫锌铝合金组织和阻尼性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17: 1685–1688.
- [29] QIN Y, WEN P, VOSHAGE M, et al. Additive manufacturing of biodegradable Zn-xWE43 porous scaffolds: formation quality, microstructure and mechanical properties [J]. *Materials and Design*, 2019, 181: 107937.
- [30] 刘晓倩. 多孔Zn合金的阻尼性能及应变率效应 [D]. 沈阳: 东北大学, 2023.
- [31] DAOUD A. Synthesis and characterization of novel ZnAl22 syntactic foam composites via casting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 488: 281–295.
- [32] MOVAHEDI N, FIEDLER T. Sustainable metallic syntactic foams containing cork particles [J]. *Materials Letters*, 2024, 358: 135866.
- [33] HASSEIN-BEY A H, BELHADJ A E, TAHRAOUI H, et al. Experimental investigation of fluid flow through zinc open-cell foams produced by the excess salt replication process and suitable as a catalyst in wastewater treatment [J]. *Water*, 2023, 15 (7) : 1405.
- [34] BROXTERMANN S, VESENJAK M, KRSTULOVIC-OPARA L, et al. Quasi static and dynamic compression of zinc syntactic foams [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 768: 962–969.
- [35] MOVAHEDI N, VESENJAK M, KRSTULOVIC-OPARA L, et al. Dynamic compression of functionally-graded metal syntactic foams [J]. *Composite Structures*, 2021, 261: 113308.

Research Progresses in Preparation and Compressive Properties of Zinc Foams

ZHANG Yu¹, WANG Ying-yu¹, SUN Wei-bo¹, SUN Guang-zhi¹, LIU Jia-an^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China; 2. Key Laboratory of Automotive Materials of the Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China)

Abstract:

Zinc foam is an important engineering material with integrated structure and function properties, having wide application prospects in transportation, electromechanical instruments, biomedicine and other fields. The properties of zinc foams depend on their chemical composition, microstructure and macro pore structure, etc., which are all affected by the preparation technologies. In this paper, in order to further understand the correlations among the preparation technology-macro (micro) structure-compression properties of the zinc foams, and based on the research literatures at home and abroad, firstly, the preparation processes of zinc foams were introduced, the development trends of key technologies were analyzed, and the effects of process parameters on the characteristics of pore structures and related mechanisms were elaborated;. Secondly, the research status of the compressive properties of zinc foams were summarized, and the main influencing factors of the compressive properties were analyzed from all angles such as the matrix properties, the pore structures and the test conditions, and so on, and the issue of strain rate effect of zinc foam was explored; Finally, the effective ways to achieve high-performance zinc foams were discussed. and the future development of zinc foam research was prospected.

Key words:

metal foam; zinc; preparation; compressive property
