

SiC 对泡沫镁合金组织和性能的影响

袁源平¹ 陈乐平¹ 周全¹ 陈 舸² 徐 勇¹

(1.南昌航空大学航空制造工程学院; 2.上海航天精密机械研究所)

摘 要 对采用白云石作为发泡剂、SiC 作为增粘剂制备的泡沫镁合金进行了微观表征和压缩测试,考察了 SiC 加入量对泡沫镁合金压缩性能和吸能性能的影响。结果表明,白云石作为发泡剂,在泡沫镁合金制备过程中并不能完全分解,未分解白云石及其分解和反应产物在孔壁处基本均匀分布,在内孔边缘局部聚集;增粘剂 SiC 在泡沫镁合金中以颗粒物的形式存在,主要聚集于内孔边缘及孔壁组织晶界位置。SiC 含量在 5%~20% 内时,随着 SiC 加入量的增加,泡沫镁合金的密度、压缩平台应力和单位体积内吸收的能量均呈现出先减小后增大的趋势,转折点 SiC 含量为 10%。在应变量为 0~1 内,泡沫镁合金的能量吸收效率随着应变量的增加先迅速升高,随后在一定范围内波动,最后迅速下降,波动范围为 0.1~0.6。SiC 加入量对泡沫镁合金能量吸收效率的影响规律不明显。

关键词 泡沫镁合金; SiC; 密度; 压缩性能; 吸能性能

中图分类号 TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of SiC on Microstructure and Properties of Foamed Magnesium Alloy

Yuan Yuanping¹, Chen Leping¹, Zhou Quan¹, Chen Ge², Xu Yong¹

(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University;
2.Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: The micro-characterization and compressive tests of foamed magnesium alloys prepared with dolomite as foaming agent, SiC as tackifier were carried out, and effects of tackifier on the compressive properties and energy absorption of the alloy were investigated. The results reveal that the dolomite presents the un-complete decomposition as foaming agents for preparing foamed magnesium alloy. The undecomposed dolomite and its decomposition and reaction products are distributed uniformly in the pore wall and agglomerated locally at the edge of the inner pore. The tackifier SiC is agglomerated at the edge of the inner hole and the grain boundary of the pore wall structure in form of particulate in foamed magnesium alloy. Within the range of 5%~20%, with the increase of tackifier SiC content, the density, the platform stress and the absorbed energy per unit volume all shows a trend of decreases at first and then increases. The turning point is 10%. Within the range of strain of 0.1~0.6, with the increase of strain, the energy absorption efficiency of foamed magnesium alloy is increased rapidly at first, and then fluctuated up and down within a certain range, finally decreased rapidly. The fluctuation region is 0.1~0.6. The effects of SiC content on the energy absorption efficiency of foamed magnesium alloy can be ignored.

Key Words: Foamed Magnesium Alloy, SiC, Density, Compression Properties, Energy Absorption Properties

泡沫镁是一种由镁基体和大量气孔构成的具有三维孔隙结构的新型材料。相比于实体镁合金,泡沫镁合金具有更低的密度,更好的阻尼、吸声、吸能和热物理性能^[1~3]。相比于其他泡沫金属(如泡沫铝),泡沫镁合金具有更低的密度,更高的比强度和比刚度,更好的生物相容性^[4~6]。这些特殊的性能使得泡沫镁合金在航空航天、汽车和生物医学等领域都有着广阔的应用前景。

压缩性能和吸能性能是泡沫镁两个重要的性能指标。当泡沫镁受到外力作用时,其应变明显滞后于应力,在应力-应变曲线上反映为一段很长的应力平台,在平台阶段,泡沫镁吸收大量的能量,从而实现吸能缓冲的作用,因此泡沫镁具有很好的能量吸收和抗冲击性能。

研究发现,泡沫镁的压缩性能主要受孔隙率、孔结

收稿日期:2020-10-27;修改稿收到日期:2020-11-30
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2018-057);南昌航空大学研究生创新专项基金资助项目(YC2019016)
第一作者简介:袁源平,男,1995 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:2431953756@qq.com
通信作者:陈乐平,男,1964 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:jnnclp@163.com
引用格式:袁源平,陈乐平,周全,等. SiC 对泡沫镁合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):158-162.
YUAN Y P, CHEN L P, ZHOU Q, et al. Effects of SiC on microstructure and properties of foamed magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):158-162.

构和载荷类型等因素的影响^[7~9]。石守泉^[10]以 AZ91D 镁合金为原料,采用渗流铸造制备出了开孔泡沫镁合金,考察了孔隙率和温度对其压缩性能的影响,发现当孔隙率在 68%~78%、压缩温度在室温~300 ℃时,随着孔隙率和压缩温度增加,泡沫镁合金压缩强度和能量吸收能力均逐渐降低,当孔隙率为 68%、压缩温度为室温时两者均最高,达到 11.19 MPa、15.48 MJ/m³。郑照彬^[11]以球形 CaCl₂ 颗粒为预制体原料,采用渗流铸造法制备出了球形开孔泡沫镁合金,并对其压缩性能和吸能性能进行了分析,发现随孔隙率增大,球形开孔泡沫镁的压缩应力和能量吸收能力逐渐减小。XIA X C 等^[12]研究了闭孔泡沫镁的吸能性能,发现闭孔泡沫镁的吸能性能同样随孔隙率的增大而降低。张联仁^[13]采用渗流铸造法制备了 Mg₂Si 增强 Mg 基开孔复合泡沫镁合金,并对其压缩性能和吸能性能的影响因素进行了分析,发现当 Si 含量在 1%~9%,随着 Si 含量增加,泡沫镁压缩强度先增大后减小,当 Si 含量为 5%时压缩强度最大,为 7.32 MPa,而能量吸收能力随着 Si 含量的增加逐渐降低;加入 0.5%的 Y 和 0.5%的 Sb 复合变质剂后泡沫镁压缩强度和能量吸收能力均得到提高。郝刚领等^[14]对泡沫纯镁和泡沫 AZ91 镁合金的吸能性能进行了对比,发现相比于泡沫纯镁,泡沫 AZ91 镁合金的吸能能力更强,但吸能效率较低。

当前对于泡沫镁合金制备方法的研究较多,但对于其压缩性能和吸能性能的研究报道较少,特别是对于采用白云石作为发泡剂、SiC 作为增粘剂制备的泡沫镁合金。本课题对选用白云石作为发泡剂、SiC 作为增粘剂,采用两步法制备出的泡沫镁合金进行压缩测试,研究了 SiC 含量对泡沫镁合金压缩性能和吸能性能的影响。

1 试验方法

试验原料为 AZ91D 镁合金,其化学成分见表 1。发泡剂选择尺寸为 178 μm 的天然白云石粉末颗粒,增粘剂选择尺寸为 20 μm 的 SiC 颗粒。

表 1 试验用 AZ91D 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy %						
w _B						
Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Mg
9	0.5	0.3	0.04	0.02	0.002	余量

泡沫镁合金制备具体过程见文献^[15]。将制得的泡沫镁合金加工成尺寸为 φ12 mm×20 mm 的圆柱形试样,使用 WDW-E100D 型微机控制电子万能试验机对试样进行压缩试验,压缩速率为 1 mm/min,压缩率大于 70%。

能量吸收能力和能量吸收效率是表征泡沫镁合金的能量吸收性能的重要指标。使用单位体积吸收的能量 W 来表征泡沫镁合金的能量吸收能力,计算如下:

$$W = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \tag{1}$$

式中,W 为泡沫镁合金单位体积吸收的能量;ε 为泡沫镁合金的压缩应变;σ 为泡沫镁合金的压缩应力。从式(1)可以看出,泡沫镁合金单位体积吸收的能量即为其压缩应力-应变曲线对应的面积。

泡沫镁合金的能量吸收效率是指压缩过程中任意应变下实际吸收的能量与理想吸能材料在相同应变下吸收的能量之比,计算如下:

$$\eta = \frac{\int_0^\epsilon \sigma d\epsilon}{\sigma_{\max} \times \epsilon} \tag{2}$$

式中,η 为泡沫镁合金的能量吸收效率;σ_{max} 为 0~ε 范围内泡沫镁合金压缩应力的最大值。

当白云石加入量为 2%、加入温度为 650 ℃、发泡温度为 720 ℃、发泡时间为 8 min 时,研究了 SiC 含量为 5%、10%、15%、20%时对泡沫 AZ91D 镁合金宏观形貌、密度和压缩及吸能性能的影响,并对其进行了微观表征。为排除孔隙率对试验结果的影响,所用压缩试样孔隙率均为 71%。

2 试验结果与分析

2.1 泡沫镁合金的宏微观组织与结构

图 1 为不同 SiC 含量下泡沫 AZ91D 镁合金的宏观形貌。可以看出,当 SiC 含量为 5%时,泡沫镁合金上部发泡区域与底部无泡层发生脱离,泡沫镁合金宏观体积较小且有局部大孔缺陷;当 SiC 含量为 10%时,泡沫镁合金宏观体积增大;在 10%~20%范围内,随着 SiC 加入量增加,泡沫镁合金宏观体积逐渐减小;当 SiC 加入量为 15%时,泡沫镁合金孔隙结构均匀性最好,大孔缺陷最少。

图 2 为 SiC 含量对泡沫镁合金密度和孔隙率的影响。可以看出,在 5%~20%范围内,随着 SiC 含量增加,泡沫镁合金的密度先减小后增大;当 SiC 含量为 10%时,泡沫镁合金密度最小,为 0.36 g/cm³。

由于白云石的密度大于镁合金熔体的密度,因此白云石加入熔体内后会发生沉积,白云石分解后产生的气泡将逐渐上浮,上浮过程中相邻气泡间容易发生合并长大并逸出熔体。SiC 颗粒能够作为固相粒子稳定地存在于泡沫镁合金中,从而提高镁合金熔体的粘度。当熔体粘度增大后,一方面白云石向下沉积受到的阻力增大,从而减弱发泡剂聚集于下部的现象,有利于发泡剂

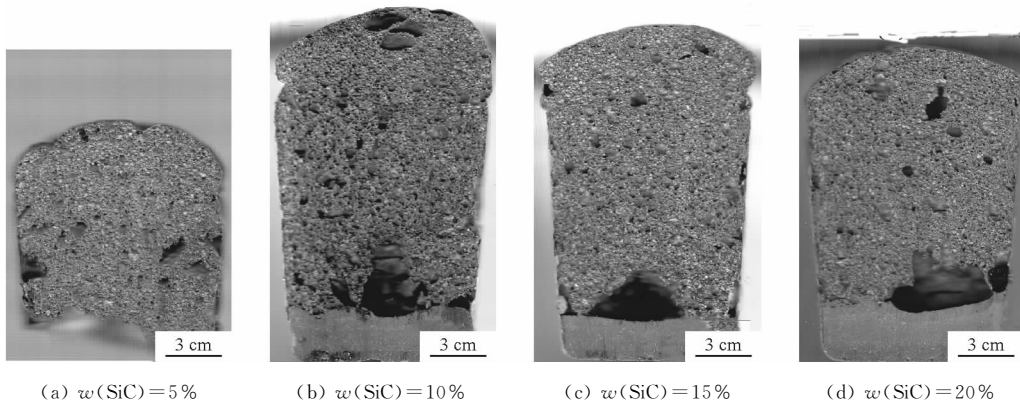


图 1 不同 SiC 含量时泡沫 AZ91D 镁合金的宏观结构

Fig.1 Macro-structure of foamed magnesium alloy with different addition of SiC

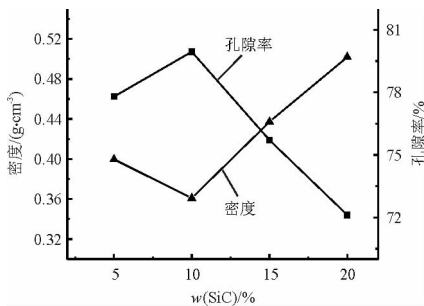


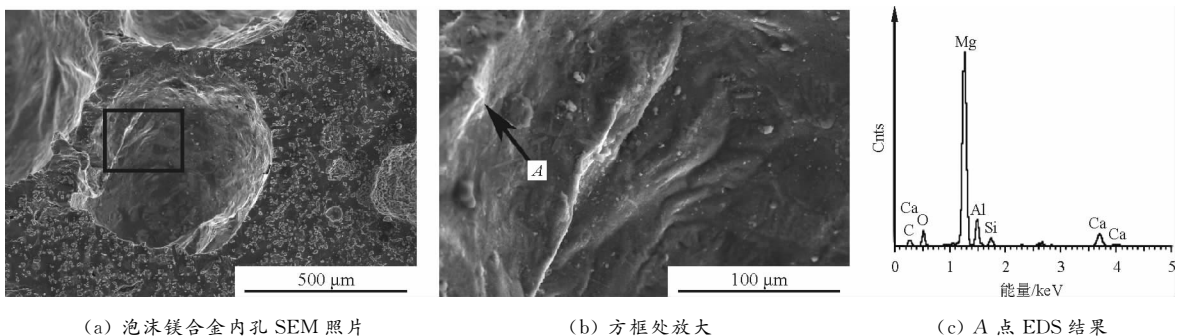
图 2 SiC 含量对泡沫镁合金密度和孔隙率的影响

Fig.2 Effects of addition of SiC on density and porosity of foamed magnesium alloy

均匀分布于熔体内,提高泡沫镁合金的孔隙均匀性,另一方面,粘度的增加使得气泡上浮过程中受到的阻力增大,从而减少气泡上浮逸出以及气泡间的合并长大。因此, Si 含量在 5%~10% 范围内时,随着 SiC 含量增加,泡沫镁合金的密度逐渐减小,大孔缺陷逐渐减少;当镁

合金熔体粘度过大时,一方面,搅拌过程中受到的阻力较大,难以搅拌均匀,从而使得发泡剂不能均匀分布于熔体内,另一方面,气泡长大所受的阻力增大,从而使得部分气泡难以长大甚至消失,泡沫镁合金内孔隙结构减少,因此 Si 含量在 10%~20% 内时,随着 SiC 含量增加,泡沫镁合金密度逐渐增加。

图 3 为 SiC 含量为 15% 时增粘制备的泡沫镁合金内孔的 SEM 照片和 EDS 结果。可以看出,泡沫镁合金相邻两气孔之间通过孔壁隔开,气孔表面为一层带有褶皱的薄膜,薄膜上附有形状不一的小颗粒,颗粒在气孔边缘处富集。图 3b 和图 3c 分别为气孔边缘处的局部放大图和 EDS 结果,可以看到,该部位除了含有大量 Mg 元素外,还含有 C、O、Ca、Al、Si 等元素,推测此处有未分解的白云石或其分解产物和反应产物,如 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Al_4C_3 、 Mg_2C 等,此外还分



(a) 泡沫镁合金内孔 SEM 照片

(b) 方框处放大

(c) A 点 EDS 结果

图 3 泡沫镁合金内孔的 SEM 照片和 EDS 结果

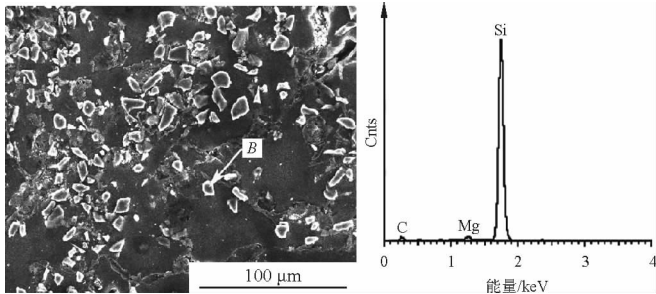
Fig.3 SEM photographs and EDS spectrum of the inner holes in foamed magnesium alloy

布有 SiC 颗粒。

图 4 为 SiC 含量为 15% 时泡沫镁合金孔壁处的 SEM 照片和 EDS 结果。可以看出,孔壁处组织除灰黑色基体和沿晶界呈网状分布的第二相外,还存在着大量沿晶界分布的尖角状颗粒物。从图 4b 可以看到,颗粒物内含有大量 Si 元素,而 Si 主要来源于 SiC,因此认为孔壁组织中出现的白色颗粒为 SiC 颗粒,其在孔壁组

织中主要沿晶界分布,与第二相混杂在一起。

图 5 为 SiC 含量是 15% 时的泡沫镁合金的 XRD 图谱。可以看出,泡沫镁合金中除了含有大量的 Mg 外,还有 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 、SiC、 MgO 、 Al_2O_3 、 MgCO_3 、 Al_2Ca 、 Al_4C_3 、 CaCO_3 、 CaO 等相的存在,由此也可证明,白云石在泡沫镁合金制备过程中未完全分解, SiC 也能够稳定地存在。



(a) 泡沫镁合金孔壁处的 SEM 照片 (b) B 点 EDS 结果

图 4 SiC 含量为 15% 时泡沫镁合金孔壁处的 SEM 照片及 EDS 结果

Fig.4 SEM photographs and EDS of foamed magnesium alloy at the pore wall with SiC content of 15%

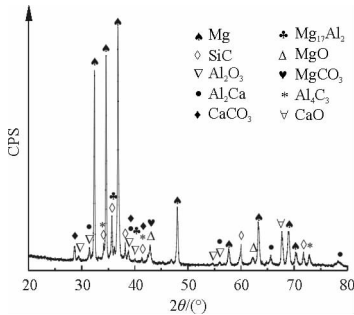


图 5 泡沫镁合金 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of foamed magnesium alloy

2.2 SiC 含量对泡沫镁合金压缩性能的影响

图 6 为不同 SiC 含量的泡沫镁合金压缩应力-应变曲线。可以看出,泡沫镁合金压缩变形过程主要经历 3 个阶段,即弹性变形阶段、塑性平台阶段和致密化阶段。在变形初期,由于泡沫镁合金具有一定的强度,泡沫镁合金孔壁并不会立刻出现裂纹和坍塌,此时泡沫镁合金发生弹性形变,随着应变增加,泡沫镁合金受到的应力逐渐增大;越过屈服点后,泡沫镁合金进入塑性变形阶段,泡沫镁合金孔壁出现裂纹并逐渐崩塌,随着应变增加,泡沫镁合金所受应力上下波动,整体上呈现出一段较长的应力平台;随着变形进一步进行,泡沫镁合金孔壁全部崩塌,进入致密化过程,此时变形过程趋于实体金属变形过程,随着应变的增加,所受应力迅速增加。

不同 SiC 含量的泡沫镁合金应力-应变曲线波动较大,容易出现相交点,规律性不强。总体上,随着 SiC 加入量的增加,泡沫镁合金弹性变形阶段先变短后变长,平台应力先减小后增大,转折点为 10%,应力平台长度大致相同。

SiC 在泡沫镁合金中除了可作为增粘剂发挥作用外,还可作为增强相提高泡沫镁合金的强度。在 Si 含量为 10%~20% 范围内,随着 SiC 含量的增加,泡沫镁合金内颗粒增强相增多,合金强度提高,出现裂纹和孔壁坍塌所需应力增大,因此平台应力增大。当 SiC 含量

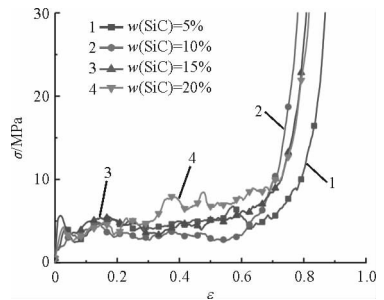


图 6 SiC 加入量对泡沫镁合金压缩应力-应变曲线的影响

Fig.6 Effects of addition of SiC on stress-strain curve of foamed magnesium alloy

为 5% 时,虽然颗粒增强相较少,但熔体粘度适中,有利于增粘剂和发泡剂的均匀分布,避免出现局部团聚,使得泡沫镁合金结构更加均匀,缺陷较少,平台应力反而比 SiC 含量为 10% 的高。

2.3 泡沫镁合金的能量吸收性能

2.3.1 SiC 含量对泡沫镁合金能量吸收特性的影响

图 7 为不同 SiC 含量的泡沫镁合金能量吸收特性曲线。可以看出,当应变较小时,单位体积吸收的能量增加较缓慢,当应变较大时,单位体积内吸收的能量增加较快;当 SiC 作为增粘剂且应变小于 0.8 时,相同应变下,随着增粘剂 SiC 含量的增加,泡沫镁合金单位体积吸能先减小后增大,转折点为 10%。

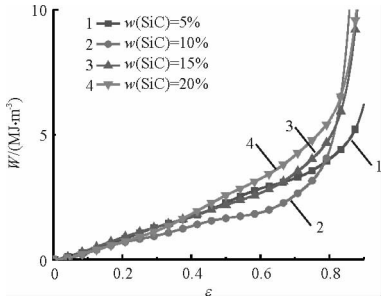


图 7 不同 SiC 含量的泡沫镁合金能量吸收特性曲线
Fig.7 Effect of addition of SiC on energy absorption characteristic curve of foamed magnesium alloy

由式(1)可知,泡沫镁合金单位体积内吸收的能量即为泡沫镁合金压缩应力-应变曲线对应的面积。在应变初期,泡沫镁合金发生弹性变形,随着应变增加,泡沫镁合金单位体积内吸收的能量缓慢增加;随着压缩过程进行,泡沫镁合金逐渐进入塑性变形平台阶段,此时由于平台应力大小和平台长度的不同,泡沫镁合金单位体积内吸收的能量差别变大,泡沫镁合金的能量吸收能力主要取决于平台阶段的应力-应变情况;当泡沫镁合金内的孔隙结构全部坍塌后,泡沫镁合金此时的压缩变形情况与实体镁合金类似,随着应变增加,泡沫镁合金单位体积吸收的能量迅速增加。

当 SiC 含量在 5%~20% 范围内时,随着 SiC 含量的增加,平台应力先减小后增大,泡沫镁合金压缩应力-应变曲线对应的面积先减小后增大,泡沫镁合金单位体积内吸收的能量先减小后增大,转折点为 10%。

2.3.2 SiC 含量对泡沫镁合金能量吸收效率的影响

图 8 为不同 SiC 含量的泡沫镁合金能量吸收效率的影响。可以看出,泡沫镁合金能量吸收效率变化同样经历 3 个阶段:当应变较小时,随着应变增加,泡沫镁合金的能量吸收效率快速增长;当达到能量吸收效率顶点后,随着应变增加,泡沫镁合金的能量吸收效率在一定范围内波动,形成一个较长的平台区域,在本试验中平台区域多出现在应变量为 0.1~0.6 范围内,平台区域泡沫镁合金的吸能效率多在 0.5~0.9 范围;当应变大于 0.6 时,随着应变增加,泡沫镁合金的能量吸收效率迅速下降。相同应变下, SiC 含量对泡沫镁合金能量吸收效率的影响不明显。

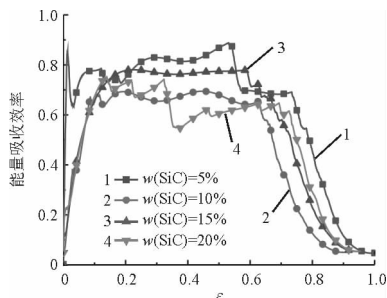


图 8 不同 SiC 含量的泡沫镁合金能量吸收效率

Fig.8 Effects of addition of SiC on energy absorption efficiency of foamed magnesium alloy

泡沫镁合金能量吸收效率与其压缩变形状态有关。变形初期,泡沫镁合金发生弹性变形,此时材料能量吸收效率较高,随着应变增加,泡沫镁合金能量吸收效率迅速增加;在应力平台阶段,泡沫镁合金孔壁开始坍塌,能耗机制发挥作用,压缩应力在一定范围内上下波动,此时能量吸收较为平稳,能量吸收效率出现一个平台区域并在此区域上下波动;当孔壁完全坍塌后,泡沫镁压缩过程与实体镁合金类似,孔壁的能耗机制失去作用,泡沫镁合金能量吸收效率迅速下降。

3 结 论

(1)白云石作为发泡剂,在泡沫镁合金制备过程中并不能完全分解,未分解白云石及其分解和反应产物在孔壁处基本均匀分布,在内孔边缘局部聚集;增粘剂 SiC 在泡沫镁合金中以颗粒物的形式存在,主要聚集于内孔边缘及孔壁组织晶界位置。

(2)当 SiC 含量在 5%~20% 范围内时,随着 SiC 加入量的增加,泡沫镁合金的密度先减小后增大,转折

点为 10%。

(3)在 Si 含量 5%~20% 内时,随着 SiC 加入量的增加,泡沫镁合金压缩平台应力和单位体积内吸收的能量先减小后增大,转折点为 10%,综合考虑, SiC 含量为 20% 时最好。

(4)在应变量为 0~1 内,泡沫镁合金的能量吸收效率随着应变量的增加先迅速升高,随后在一定范围内(0.1~0.6)上下波动,最后迅速下降。 SiC 含量对泡沫镁合金能量吸收效率的影响规律不明显。

参 考 文 献

- [1] HUANG W Z, LUO H J, MU Y L, et al. Low-frequency damping behavior of closed-cell Mg alloy foams reinforced with SiC particles [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2017, 24(6): 701-707.
- [2] 封伟民. 泡沫镁材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [3] 杨厚乐, 郭茶秀, 周俊杰. 泡沫金属换热器开发及性能研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(3): 78-83.
- [4] YAZDIMAMAGHANI M, RAZAVI M, VASHAEE D, et al. Porous magnesium-based scaffolds for tissue engineering[J]. Materials Science & Engineering, 2017, C71: 1 253-1 266.
- [5] LI Y, JAHR H, ZHANG X Y, et al. Biodegradation-affected fatigue behavior of additively manufactured porous magnesium[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 299-311.
- [6] SAAD A P M, RAHIM R A A, HARUN M N, et al. The influence of flow rates on the dynamic degradation behaviour of porous magnesium under a simulated environment of human cancellous bone[J]. Materials & Design, 2017, 122: 268-279.
- [7] JIANG G F, LI Q Y, WANG C L, et al. Characterization and investigation of the deformation behavior of porous magnesium scaffolds with entangled architected pore channels[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 64: 139-150.
- [8] AN Y, WEI C, HODGSON P D, et al. Investigation of cell shape effect on the mechanical behaviour of open-cell metal foams[J]. Computational Materials Science, 2012, 55: 1-9.
- [9] SUN Y L, LI Q M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 112: 74-115.
- [10] 石守泉. 高性能泡沫镁的制备及其压缩性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [11] 郑照彬. 球形孔开孔泡沫镁的性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [12] XIA X C, CHEN X W, ZHANG Z, et al. Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013(1): 330-335.
- [13] 张联仁. 原位自生 Mg_2Si 颗粒增强镁基复合泡沫的制备及压缩性能[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [14] 郝刚领, 韩福生, 王伟国. 镁基多孔材料准静态压缩行为与吸能特性研究[J]. 材料工程, 2013(2): 29-34.
- [15] 袁源平, 陈乐平, 周全, 等. 白云石制备泡沫镁合金的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 874-879.

(编辑:张正贺)