

闭孔金属基复合泡沫材料制备技术研究 进展

历长云¹⁾, 杨二阔²⁾, 李雷³⁾, 许磊^{1)✉}, 米国发²⁾

1) 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 克拉玛依 83400 2) 河南理工大学材料科学与工程学院, 焦作 454000

3) 上海电机学院材料学院, 上海 201306

✉通信作者, E-mail: xulei_80@126.com

摘要 闭孔金属基复合泡沫材料是一种新型多孔复合材料, 主要以空心微球和基体粉末为原料, 将空心微球填充到金属或合金基体中复合而成; 因其具有轻质、高强、良好的阻尼、吸能、隔热、隔音及电磁屏蔽等诸多优异性能, 在减震、缓冲阻尼及防撞击等相关领域具有广泛的应用价值。本文主要介绍了利用空心微球制备闭孔金属基复合泡沫材料的方法, 总结了其制备过程中存在的问题, 并概述了闭孔金属基复合泡沫材料的应用。

关键词 空心微球; 金属基复合泡沫材料; 粉末冶金; 吸能性

分类号 B333; TF12

Research progress and preparation of closed-cell metal matrix syntactic foams

LI Chang-yun¹⁾, YANG Er-kuo²⁾, LI Lei³⁾, XU Lei^{1)✉}, MI Guo-fa²⁾

1) Faculty of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 83400, China

2) School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

3) School of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China

✉Corresponding author, E-mail: xulei_80@126.com

ABSTRACT Closed-cell metal matrix syntactic foam (MMSF) is a kind of new porous composite materials formed by embedding the hollow microspheres into the metal or alloy matrix, using the hollow microspheres and metal powders as the raw materials. Due to the lightweight, high strength, good damping, energy-absorbing capability, thermal insulation, sound absorption, electromagnetic shielding, and other excellent properties, the closed-cell metal matrix syntactic foams can be widely used in the fields of shock absorption, buffer damping, and impact prevention. The preparation method of the closed-cell metal matrix syntactic foams by hollow microspheres were introduced in this paper, some problems existing in the preparation process were summarized and the application of the closed-cell metal matrix foams were overviewed.

KEY WORDS hollow microspheres; metal matrix syntactic foams; powder metallurgy; energy-absorbing capability

收稿日期: 2020-07-24

基金项目: 中国石油大学(北京)克拉玛依校区科研启动基金资助项目(XQZX20200016、XQZX20200019); 克拉玛依市科技计划资助项目(XQZX20200036)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020070009; <http://journals.ustb.edu.cn>

闭孔金属基复合泡沫材料 (metal matrix syntactic foams, MMSFs) 与泡沫金属相似, 是一种具有与传统材料不同结构的新型材料。它是由金属基体和空心微球复合而成的一种含有大量闭孔孔隙的金属泡沫材料, 具有比重小、吸音隔音效果好、能量吸收性好^[1]等优点, 并且具备良好的传热、电磁阻尼、摩擦磨损^[2]及压缩^[3]等特性。特别是在承受冲击载荷时, 空心微球的破碎能够有效地吸收冲击能量, 从而对基体起到保护效果。本文重点介绍了闭孔金属基复合泡沫材料的填充材料和制备工艺, 并根据其结构与性能概述了其应用。

1 填充材料—空心微球

在闭孔金属基复合泡沫材料的制备过程中, 填充材料的选择非常重要, 其性能与质量直接决定闭孔金属基复合泡沫材料的性能。如果所选择的空心微球表面有大量孔洞或破损, 在制备过程中基体容易进入空心微球内腔, 会使封闭内腔空间减小或消失, 影响金属基复合泡沫材料的性能。而且, 空心微球的种类不同, 也会影响空心微球的比重、抗压强度等性能, 从而影响最终复合泡沫材料的性能。目前, 可应用于制备闭孔金属基复合泡沫材料的空心微球种类比较多, 下面主要针对常用的几种空心微球进行介绍。

1.1 陶瓷空心微球

陶瓷空心微球根据成分划分主要包括飞灰、 Al_2O_3 空心微球及 SiC_{HP} 空心微球 (SiC_{HP})。

飞灰, 又称为粉煤灰、漂珠, 是工业生产的副产物, 由工业中煤粉燃烧所形成的一种陶瓷空心微球。飞灰的主要组成相为非晶态 SiO_2 和 Al_2O_3 , 其显微形貌如图 1 所示; 其粒径一般为 $0.5\sim 800\ \mu\text{m}$, 密度为 $0.4\sim 0.7\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 杨氏模量约为 $13\sim 17\ \text{GPa}$ ^[4]。由于飞灰的结构、形状和力学性能波动较大, 多年来主要用于制造耐火砖、铸造保温冒口以及保温隔热材料等普通产品, 附加值较低。如果将飞灰添加到铝合金、镁合金或铝镁合金中用来制备金属基复合泡沫材料, 不仅可以有效改善铝镁合金泡沫材料的综合性能, 而且可以高效利用此工业副产品, 实现高价值转化^[5-8]。

对于 Al_2O_3 空心微球, 由于其制备成本较高, 因此也常用质量分数约 40% 的 Al_2O_3 和质量分数约 60% 的 SiO_2 混合空心微球代替纯 Al_2O_3 空心微球, 其性能与纯 Al_2O_3 空心微球相当^[9]。Santa 等^[10]利用 Al_2O_3 空心微球通过低压铸造技术合成复合泡沫材

料。其准静态压缩结果表明, 复合泡沫材料在压缩破坏时, 初始阶段发生了明显的变形, 随后发生空心球的破坏, 并与基体一起被压缩致密化。复合泡沫材料的峰值强度、平台强度和韧性随着空心微球壁厚厚度 (t) 与直径 (D) 比值 (t/D) 的增加而增加。研究发现, t/D 随空心微球直径的减小而增加, 所以用小粒径微球生产的复合泡沫材料表现出较好的性能。

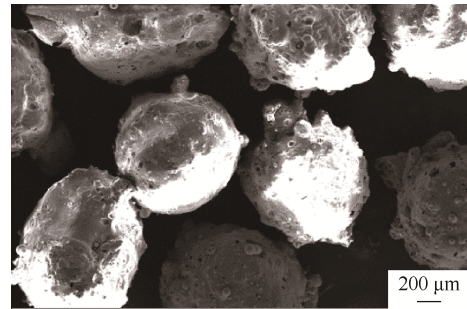


图 1 飞灰显微形貌

Fig.1 Microstructure of the fly ash

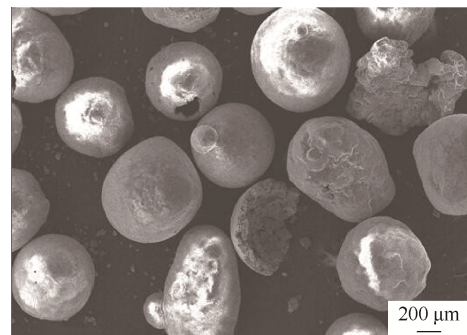


图 2 Al_2O_3 空心微球显微形貌

Fig.2 Microstructure of the Al_2O_3 hollow microspheres

与飞灰、 Al_2O_3 空心微球相比, SiC_{HP} 具有更高的硬度、更高的热导率及更低的膨胀率等优点, 现在已成为复合泡沫材料重要的填充材料^[11-12]。 SiC_{HP} 除了具有传统 SiC 的性能以外, 还具有壳结构的经典物理性质, 包括电气绝缘、光学效益、极端硬度、耐化学腐蚀等^[13-14]。因此, SiC_{HP} 应用于闭孔金属基复合泡沫材料的制备, 不仅可以保持其本身固有特性, 拥有壳结构的物理特点, 还将极大降低闭孔金属基复合泡沫材料的密度, 提高复合材料的比强度与比刚度。 SiC_{HP} 的密度 (ρ_{HS}) 可根据式 (1)^[13] 进行计算。

$$\rho_{\text{HS}} = \rho_{\text{SiC}} (1 - \eta^3) \quad (1)$$

式中: $\eta = R_i/R_0$, R_i 为空心微球内径, R_0 为空心微球

外径, ρ_{SiC} 为实心 SiC 密度。由式 (1) 可得, SiC_{HP} 的密度取决于微球壳内外径比。由于实际的 SiC_{HP} 微球壁不可避免地会存在不同程度的孔洞^[14], 所以 SiC_{HP} 的实际密度值一般都比理论值低; 而且相比于实体颗粒, SiC_{HP} 的薄壁结构也导致其剪切强度明显降低。研究也表明, 与飞灰相比, 采用 SiC_{HP} 制备的复合泡沫材料具有更高的强度, 如 Luong 等^[15]发现, $\text{SiC}_{\text{HP}}/\text{Al}$ 复合泡沫材料的抗压强度远高于飞灰/Al 复合泡沫材料。

1.2 玻璃微珠

玻璃微珠为浅白色粉末, 具有薄壁空心结构, 实际密度为 $0.125\sim 0.60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 软化温度约 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 导热率为 $0.05\sim 0.20\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。Lin 等^[16]研究了玻璃微珠与纯 Al 及 Al-Mg 合金制备的复合泡沫材料, 结果表明玻璃微珠/纯 Al 在压缩过程中表现出不连续的剪切带和鼓形, 而玻璃微珠/Al-Mg 合金则显示出连续的剪切带, 并被主剪切区分开。在拉伸状态下, 纯 Al 基复合泡沫中的玻璃微珠容易从基体上剥离, 而 Al-Mg 基复合泡沫中的玻璃微珠粘结良好, 并出现层状撕裂。导致这种变形行为差异的原因是 Al-Mg 基体本身具有的延展性, 以及玻璃微珠与 Al-Mg 基体发生界面反应生成的 MgAl_2O_4 层促进了其界面结合。

1.3 浮石 (LECAP)

浮石是一种低成本的天然多孔火山石粉末, 表面坚固且封闭, 但内部存在许多大小不一的孔隙。单个颗粒内部孔的尺寸处于微米至毫米范围, 其孔的大小对浮石颗粒的力学性能影响较大^[17]。采用浮石填充的闭孔金属基复合泡沫材料可大量用于高吸能领域, 例如建筑物的保护。

2 闭孔金属基复合泡沫材料的制备方法

闭孔金属基复合泡沫材料的制备方法与一般金属基复合材料类似, 根据制备中基体的状态大致可以分为液态法和固态法两大类。

2.1 液态法

液态法制备闭孔金属基复合泡沫材料的常用方法主要包括: 低压铸造法、压力浸渗法、搅拌铸造法和重力铸造法等。

2.1.1 低压铸造法

低压铸造法是把混合有空心微球的液体金属在压力作用下由下而上充满型腔后形成铸件的一种方法。陈健美等^[18]采用低压铸造法制备不同粒径的陶瓷空心微球/铝基泡沫材料, 具体步骤如下: 将陶瓷

空心微球填充到模具中, 预热到指定温度 $440\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与此同时将铝加热 ($730\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$) 至熔融状态, 低真空 ($0.03\sim 0.05\text{ MPa}$) 吸入型模中, 合金凝固后取样得到闭孔金属基复合泡沫材料。研究发现, 陶瓷空心微球在铝基体中分布较为均匀, 陶瓷微球与基体之间未出现裂纹和缝隙, 且未出现明显的元素扩散现象; 所制备的小粒径空心陶瓷微球铝基复合泡沫材料的压缩应力高于大粒径的复合泡沫材料。Malik 等人^[6]将空心微球紧密放置在圆筒模具中, 预热至 $773\text{ }^{\circ}\text{C}$, 然后将液态金属倒入浇口, 同时在底部施加负压, 使液态金属充满陶瓷空心微球之间的间隙, 制备出闭孔金属基复合泡沫材料。结果表明, 低压铸造法可有效用于制备孔隙均匀分布的复合泡沫材料, 但是由于液态金属温度较高, 空心微珠与液态金属容易发生界面反应生成 Mg_2Si 和 MgO 。Zhang 等人^[19]采用直径为 $0.25\sim 4\text{ mm}$ 的陶瓷空心微球通过低压铸造法制备出铝基复合泡沫材料, 其密度为 $1.38\sim 1.88\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 孔隙率范围为 $0.31\sim 0.51$ 结果发现, 在静态压缩和冲击试验中, 复合泡沫材料中铝基体的体积分数起主导作用, 决定了材料的抗压强度。

低压铸造法制备闭孔金属基复合泡沫材料工艺简单, 但是由于空心微球密度较低, 在液态金属中容易漂浮, 导致在基体中分布不均, 且制备过程温度较高, 容易发生界面反应, 玻璃微球容易发生软化。此外, 空心微珠体积分数不好控制, 使用设备具有较大局限性, 不适合大范围普及。

2.1.2 压力浸渗法

压力浸渗法是采用高压使液态熔融金属以较高速率压入空心微球的间隙, 从而制备闭孔金属基复合泡沫材料的一种方法。在制备过程中, 压力和时间是主要工艺参数。在压力浸渗过程中, 如果施加的压力超过空心微球的强度, 薄壁空心微球易破碎并被基体合金填充。Lin 等^[16]用玻璃微珠填充纯 Al 和 Al-Mg 合金, 以压力浸渗法制备 Al 基复合泡沫材料, 并研究 Al 基复合泡沫材料的力学性能与失效机制。首先, 将玻璃空心微球垂直放入压力为 0.5 MPa 的钢模中, 然后在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下预热; 再使用加压设备将熔融铝渗入预成型坯中, 并在 0.8 MPa 下保持 5 min , 直到完全固化。Orbulov^[20]用陶瓷空心微球以压力浸渗法制备金属基复合泡沫材料并研究浸渗温度、时间对浸渗长度的影响。结果表明, 较高压力 (750 kPa) 和较短时间 (1 s) 下制备的给定渗透长度的金属基复合泡沫材料具有更好的力学性能。

压力浸渗方法虽然可以解决空心微球的漂浮问题,但是容易导致空心微球破损,且制备过程温度较高,容易导致空心微球与基体发生界面反应。此外,对设备密封性要求较高,因此制造成本增加。

2.1.3 搅拌铸造法

搅拌铸造法是指在气体保护下将熔融金属与空心微球在坩埚中进行机械搅拌,使空心微球全部分散至金属基体熔液中,然后铸入金属模或砂模中。此方法不需要专用的设备、高昂的成本和能源消耗。搅拌铸造法非常流行且有效地用于制造含有固体硬质颗粒的金属基复合材料(MMC),但将其用于含有空心微球的复合材料仍存在许多困难,主要问题是在搅拌过程中,空心微球壳会被机械破坏^[6, 21, 22]。脆性空心微球与搅拌臂的碰撞可能会导致其破裂,然后被熔融的基体合金填充;同时,难以精确把握搅拌时间与温度,在浇注过程中,部分未充分润湿的空心微球会发生上浮,导致材料阶梯化分层。Mondal等^[23]采用搅拌铸造法制备出空心微球体积分数为30%~50%、密度为1.5~1.9 g·cm⁻³的铝基复合泡沫材料。具体步骤如下:先将A2014铝合金加热至熔融状态,同时将空心微珠预热,然后通过机械搅拌将预热的空心微珠在熔体中混合,并加以轻微压力(1~3 MPa),在预热的模具中铸造得到闭孔金属基复合泡沫材料。结果发现,通过搅拌铸造制备的闭孔金属基复合泡沫材料的压缩变形行为与传统方法制备的低密度复合泡沫材料相似,但前者的平台应力值更高。而且,金属基复合泡沫材料的平台应力与空心微球的密度及其体积分数有关,可以通过以下的公式进行计算:

$$\sigma_{sf} = C \left\{ \sigma_0 (1 - f_c)^n + C \sigma_{mu} [(1 - f_{vsh})(1 - f_{cv})]^n \right\} \quad (2)$$

式中: σ_{sf} 是合成的金属基复合泡沫材料的压缩强度, σ_0 是空心微球的抗压强度, σ_{mu} 是对应实心微球的抗压强度, f_c 是空心微球的实验体积分数, f_{vsh} 是空心微球壳空心的体积分数, f_{cv} 是空心微球空心部位的体积分数, C 、 n 值为常数,随材料、测量方法而变化。

Huang等^[7]通过搅拌铸造法制备出质量分数分别为4%、6%、8%、10%的飞灰/AZ91D镁基复合泡沫材料。结果表明,微球未发生聚集且均匀分布在基体中,部分微球破损并被填充了Mg合金,分析发现飞灰与AZ91D的界面产物主要为MgAl₂O₄。

2.1.4 重力铸造法

重力铸造是指金属溶液在自身重力作用下,注入已放入空心微球的铸型中而制备的一种工艺方

法。该方法优点在于实验中无需抽真空、施加压力,工艺设备简单、成本低,更适合工业化生产。Rabiei等人^[24]采用重力铸造法制备闭孔铝基复合泡沫材料,其密度达到2.4 g·cm⁻³,相对密度为41.5%,并显示出优异的压缩强度和吸能能力,在10%~50%的应变变量下,平均压缩强度达到了67 MPa,在近50%应变变量时,复合泡沫材料开始发生致密化行为,此时吸收能为30 MJ·m⁻³。其具体过程如下:将铁空心微球装入到模具中,振动达到致密状态,然后在700℃下预热装好的模具,以避免铝液在铸造过程中与模具或空心微球接触时过早凝固;同时,在熔炉中将铝加热到700℃使其完全熔化,然后将铝液浇注到模具中,在重力作用下填充铁空心微球间的空隙,最终空冷后取样。对于密度较大的空心微球,可以采用重力铸造法制备闭孔金属基泡沫复合材料,如果选择低密度空心微球,浇注过程中空心微球容易悬浮,导致无法制备出孔隙均匀的泡沫材料。

综上所述,重力铸造法是目前制备金属基复合泡沫材料的主要方法。但该方法也存在着一些问题,如搅拌铸造过程中易卷入气体,很难把握搅拌的时间与温度,在浇注过程中如果不采取措施,未湿润的空心微球会上浮,导致空心微球偏聚,从而导致材料发生分层。压力浸渗法虽然能够解决空心微球偏聚问题,但如上所述,其设备封闭要求很高;且与重力铸造法类似,压力浸渗法难以浸渗到小粒径空心微球之间的间隙中;在铸造过程中,铸型中的气体很难完全排除,常以气孔形式留在铸件中,使其无法进行热处理,也不宜在高温条件下工作。

2.2 固态法

闭孔金属基复合泡沫材料固态制备法主要有粉末冶金法、热挤压法、喷射沉积法等。

2.2.1 粉末冶金法

固态法制备金属基复合泡沫材料最常用的就是粉末冶金法,其典型的工艺流程如图3所示^[25]。粉末冶金法常采用机械法来混粉制备复合粉末,空心微球的含量可任意调整并准确控制,且基体能与空心微球均匀混合;此外制备时烧结温度一般都低于基体的熔点,可以有效避免基体与空心微球发生界面反应,生成有害的脆性相从而破坏材料的综合性能。这种低温合成工艺还可以有效控制空心微球与基体的界面并限制基体晶粒的尺寸。但在粉末冶金法制备中,施加的压力容易导致空心微球发生破碎,并被基体粉末填充^[26]。因此,粉末冶金制备中需要注意在压制过程中选择合适的压力。

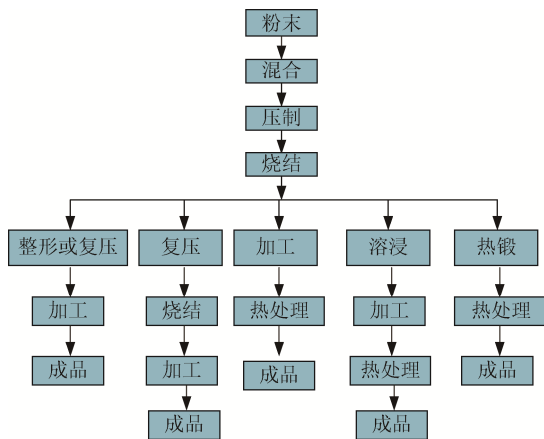


图3 粉末冶金法制备闭孔金属基复合泡沫材料工艺流程^[31]

Fig.3 Typical preparation process of the closed-cell metal matrix syntactic foams by powder metallurgy

(1) 预冷压烧结法

Neville 等人^[27]采用粉末冶金技术将钢粉末填充到紧密堆积的钢空心微球之间制备复合泡沫材料。所制备的复合泡沫材料具有优异的抗压性和吸能性,并且具有较高的比强度。Cho 等^[28]采用粉末冶金法制备玻璃微珠/铁基复合泡沫材料,在其生坯预冷压过程中,随着压实应力的提高,基体发生致密化,微珠出现破裂、软化、收缩,复合泡沫材料的相对密度增加。研究还发现,引起微珠破裂的临界压实压力与微珠的体积分数成反比,因此在制备时需要控制合适的压实压力。Vogiatzis 等人^[21]通过粉末冶金法将陶瓷空心微球添加到纯铝中,在 610~710 °C 下制备铝基复合泡沫材料。结果表明,陶瓷空心微球的二氧化硅与铝颗粒之间发生原位反应形成共晶铝硅相。Akinwekomi 等^[29]通过粉末冶金和微波烧结技术成功合成飞灰/铝复合泡沫材料。结果表明,复合微波烧结的烧结时间极短,可抑制不良界面反应的发生;随着飞灰体积分数的增加,复合泡沫材料的密度、峰值强度和能量吸收能力降低;样品的应力-应变曲线较长且具有相对稳定的平稳区

域,说明此种复合泡沫材料在能量吸收和低密度应用领域有较好的前景。王庆平等^[30]采用粉末冶金法制备了漂珠/Al-25%Mg 复合泡沫材料,研究结果表明,随着漂珠含量的增加,复合泡沫材料的硬度呈现先增大而后减小的趋势。

(2) 金属粉末注射成形

金属粉末注射成形法制备时将金属粉末、空心微球、粘结剂和润滑剂均匀混合,去气、制粒之后用注射成形机注射成形,然后用化学法或热分解法去除原坯中的粘结剂,最后经烧结致密化得到闭孔金属基复合泡沫材料。Lehmhus 等^[31]采用金属粉末注射成形法分别制备了质量分数 5%、10% 的玻璃珠/316 不锈钢复合泡沫材料。原料注射过程在 110~130 °C 和 50~60 °C 模具温度下进行,将制成的原坯在己烷中进行化学处理,30 °C 保温约 24 h,然后进行热处理并进行金属粉末的烧结,以 0.1 K·min⁻¹ 缓慢升温至 500 °C,并保温 1 h,之后以 5 K·min⁻¹ 进一步升温至 1000 °C,保持 3 h,再以 5 K·min⁻¹ 升温至 1200 °C,并保温 1.5 h 进行最终烧结。结果表明,空心微球在烧结过程中能够保持其完整性,力学性能明显提高,其比强度超过基体材料,且延展性保持较好。

(3) 热压烧结法

热压烧结法是将基体合金粉末与空心微球混合后的复合粉末放入模具型腔,在保护气氛或真空条件下加压加热制备复合泡沫材料。烧结时施加压力可以有效抑制基体晶粒的长大,且复合粉末在压力的作用下通过塑性流动而致密化,可节约烧结时间,这也使材料晶粒粗化的几率大幅度降低。本课题组采用热压烧结法制备了不同温度和不同体积分数条件下的空心 Al₂O₃/AZ91D 及空心玻璃/AZ91D 闭孔金属基复合泡沫材料,该复合泡沫材料显微结构如图 4 所示。由图 4 可知,空心微球在基体中均匀分布,大多数空心微球完整,小部分被填充了基体颗粒,经测量,该复合泡沫材料密度最低可达到 1.5 g·cm⁻³。

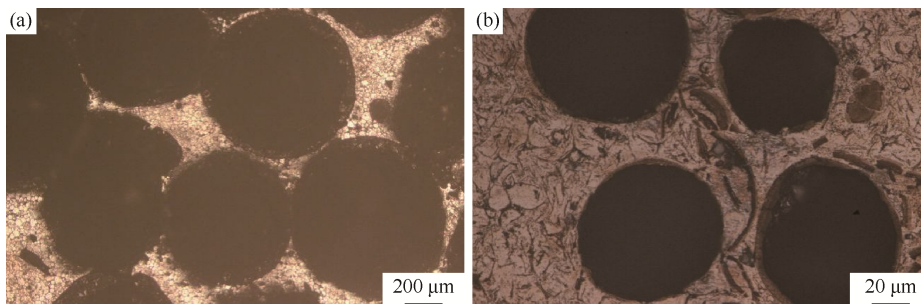


图4 热压烧结法制备闭孔金属基复合泡沫材料的微观结构:(a) 空心 Al₂O₃/AZ91D;(b) 空心玻璃/AZ91D

Fig.4 Microstructure of the closed-cell metal matrix syntactic foams prepared by hot pressing sintering: (a) Al₂O₃/AZ91D, (b) hollow glass microspheres/AZ91D

2.2.2 热挤压制备工艺

热挤压法是把挤压坯料放入与坯料外形相同的挤压筒中,在一定温度和压力的作用下从挤压模的另一端孔中挤出,使材料发生塑性变形,进而提高材料性能。Sudarshan^[32]利用搅拌铸造和热挤压的方法,采用宽粒径范围(0.5~400 μm)和窄粒径范围(53~106 μm)的漂珠制备了漂珠/A356复合材料,并研究其力学性能。结果表明,与基体材料相比,复合材料的硬度、弹性模量和屈服强度等性能得到提高,窄粒径范围的漂珠/A356复合泡沫材料的力学性能优于宽粒径范围的复合材泡沫料。

2.2.3 喷射沉积法

Manakari等^[33]通过喷射沉积法合成空心玻璃/镁复合泡沫材料,并研究了干磨条件(外加载荷30 N)下的摩擦磨损行为。结果显示,与基体合金相比,空心微球的存在为累积磨料提供了空间,使复合泡沫材料的摩擦磨损性能明显改善,且空心微球的添加含量会影响材料的磨损机制。

综上所述,固态法制备可控制基体金属或合金与空心微球之间的界面反应,同时可通过控制基体与空心微球的比例获得不同孔隙量的金属基复合泡沫材料,并且容易实现空心微球在基体中的均匀分布。

3 闭孔金属基复合泡沫材料的结构与性能

闭孔金属基复合泡沫材料的优异性能使其在轻质、吸能、声控、热控等应用领域具有重大潜力,因此在舰船航母、航天航空、土木工程等领域具有广泛的应用前景。

(1) 轻质

金属基复合泡沫材料的轻质特性,可应用于提高工程结构件的比刚度,如给定重量、宽度和长度的泡沫板弯曲刚度与其厚度成正比,与其密度成反比。

(2) 吸能性

基于闭孔金属基复合泡沫材料的高孔隙率,其在变形时可以吸收大量的机械能。图5所示为Al₂O₃/AZ91D闭孔金属基复合泡沫材料在动态冲击下的真应力应变曲线,其中曲线与X轴间的积分面积可表示吸收能。闭孔金属基复合泡沫材料由于高能量吸收能力和大压缩应变,可以充当冲击能吸收器,从而在碰撞时限制加速度,可在车辆和装甲中得到广泛应用。分离式霍普金森压力杆可用于金属基复合泡沫材料高应变率的压缩测试。Zhang等^[27]研究了玻璃空心微珠/5A03的准静态和动态压缩性能。结果表明,在准静态压缩下,玻璃空心微珠/5A03

的抗压强度为110.5 MPa,平台应力为90.6 MPa,吸能能力为51.2 MJ·m⁻³;而在动态载荷下,玻璃空心微珠/5A03的抗压强度为159.0 MPa,平台应力为125.4 MPa,吸能能力为63.4 MJ·m⁻³,说明金属基复合泡沫材料具有较好的能量吸收能力。

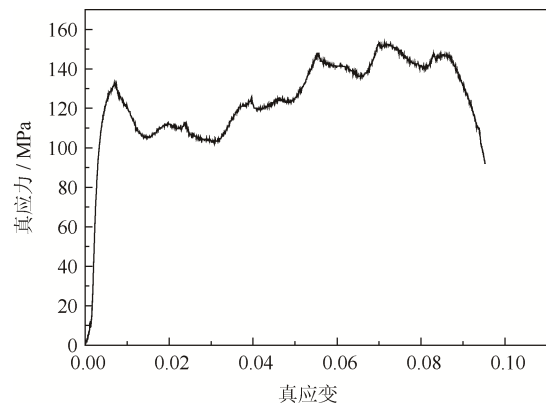


图5 Al₂O₃/AZ91D闭孔金属基复合泡沫材料动态冲击下的真应力应变曲线

Fig.5 The true stress-strain curve of the Al₂O₃/AZ91D closed-cell MMSFs in dynamic impact

(3) 声控与热控

闭孔金属基复合泡沫材料能够在某些情况下阻碍振动、吸收声波。与高分子泡沫相比,金属基复合泡沫材料热导率低,吸声吸热性能并不是非常出色,但该泡沫的内部构造与金属基复合材料的其他功能结合使用却很有优势。例如,金属基复合泡沫材料的多孔泡沫结构可以减少噪音,并在发生碰撞时吸收能量^[34]。

(4) 摩擦磨损性能

与基体合金相比,空心微球的嵌入为累积磨料提供了空间,使金属基复合泡沫材料的摩擦磨损性能明显改善。空心微球的添加量可影响材料的磨损机制,当空心微球的添加量较低时,金属基复合泡沫材料的磨损机理主要是磨粒磨损和黏着磨损;当空心微球的添加量较高时,以剥层磨损和磨粒磨损为主^[30]。

4 结论与展望

闭孔金属基复合泡沫材料具有密度低、比刚度高、比强度高、吸能性好、损伤容限高、可抑制机械振动和衰减波的传播等特点,在工业应用中有很大的潜力与优势。本文介绍了闭孔金属基复合泡沫材料的填充材料以及制备方法,并总结了其制备中

存在的部分问题。

作为填充材料的空心微球, 虽然种类较多, 但是微球存在粒度不均、壳壁存在缺陷、壁厚不均等局限性, 因此需要开发高质量、均匀粒径的空心微球, 以满足高性能金属基复合泡沫材料的制备需求。现有制备工艺尚不成熟, 迫切需要开发新型制备工艺及后续相应的热处理工艺, 以确保降低其密度的同时, 解决其强度低的问题。

参 考 文 献

- [1] Yu M, Zhu P, Ma Y Q. Experimental study and numerical prediction of tensile strength properties and failure modes of hollow spheres filled syntactic foams. *Comput Mater Sci*, 2012, 63: 232
- [2] Májlinger K. Wear properties of hybrid AlSi12 matrix syntactic foams. *Int J Mater Res*, 2015, 106(11): 1165
- [3] Wu G H, Dou Z Y, Sun D L, et al. Compression behaviors of cenosphere-pure aluminum syntactic foams. *Scr Mater*, 2007, 56(3): 221
- [4] Matsunaga T, Kim J K, Hardcastle S, et al. Crystallinity and selected properties of fly ash particles. *Mater Sci Eng A*, 2002, 325: 333
- [5] Szlancsik A, Katona B, Kemeny A, et al. On the filler materials of metal matrix syntactic foams. *Materials*, 2019, 12(12): 2023
- [6] Braszczyńska-Malik K N, Kamieniak J. AZ91 magnesium matrix foam composites with fly ash cenospheres fabricated by negative pressure infiltration technique. *Mater Charact*, 2017, 128: 209
- [7] Huang Z Q, Yu S R, LI M Q. Microstructures and compressive properties of AZ91D/fly-ash cenospheres composites. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010, 20: 458
- [8] Rajan T P D, Pillai R M, Pai B C, et al. Fabrication and characterisation of Al-7Si-0.35Mg/fly ash metal matrix composites processed by different stir casting routes. *Compos Sci Technol*, 2007, 67(15-16): 3369
- [9] Orbulov I, Májlinger K. On the microstructure of ceramic hollow microspheres. *Period Polytech Mech Eng*, 2010, 54(2): 89
- [10] Santa Maria J A, Schultz B F, Ferguson J B, et al. Effect of hollow sphere size and size distribution on the quasi-static and high strain rate compressive properties of Al-A380-Al₂O₃ syntactic foams. *J Mater Sci*, 2014, 49(3): 1267
- [11] Wu R B, Zhou K, Yue C Y, et al. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials. *Prog Mater Sci*, 2015, 72: 1
- [12] Shcherban N D. Review on synthesis, structure, physical and chemical properties and functional characteristics of porous silicon carbide. *J Ind Eng Chem*, 2017, 50: 15
- [13] Shunmugasamy V C, Zeltmann S E, Gupta N, et al. Compressive characterization of single porous SiC hollow particles. *JOM*, 2014, 66(6): 892
- [14] Wang X P, Zhang L, Yang J J, et al. Preparation and characterization of SiC hollow spheres. *Mater Rev*. 2009, 23(14): 22
(王雪平, 张磊, 杨久俊, 等. SiC 空心球的制备与表征. 材料导报, 2009, 23(14): 22)
- [15] Luong D D, Strbik III O M, Hammond V H, et al. Development of high performance lightweight aluminum alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates. *J Alloys Compd*, 2013, 550: 412
- [16] Lin Y F, Zhang Q, Ma X Y, et al. Mechanical behavior of pure Al and Al-Mg syntactic foam composites containing glass cenospheres. *Composites Part A*, 2016, 87: 194
- [17] Taherishargh M, Belova I V, Murch G E, et al. Pumice/aluminium syntactic foam. *Mate Sci Eng A*, 2015, 635: 102
- [18] Chen J M, Cui X M, Luo X, et al. The structure and property of Al matrix syntactic foam fabricated with ceramic microspheres prepared by vacuum casting method. *Hunan Nonferrous Met*, 2012, 28(3): 46
(陈健美, 崔学敏, 罗翔, 等. 真空吸铸法制备铝基空心陶瓷球泡沫材料的结构和性能. 湖南有色金属, 2012, 28(3): 46)
- [19] Zhang L P, Zhao Y Y. Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *J Compos Mater*, 2016, 41(17): 2105
- [20] Orbulov I N. Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration — The effect of infiltration parameters. *Mater Sci Eng A*, 2013, 583: 11
- [21] Vogiatzis C A, Skolianos S M. On the sintering mechanisms and microstructure of aluminium-ceramic cenospheres syntactic foams produced by powder metallurgy route. *Composites Part A*, 2016, 82: 8
- [22] Kamieniak J, Braszczyńska-Malik K N. Problems fabricating cast magnesium matrix composites with aluminosilicate cenospheres. *Compos Theory Pract*, 2014, 14: 214
- [23] Mondal D P, Das S, Ramakrishnan N, et al. Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. *Composites Part A*, 2009, 40(3): 279
- [24] Rabiei A, O'Neill A T. A study on processing of a composite metal foam via casting. *Mater Sci Eng A*, 2005, 404(1-2): 159

- [25] Jia C C, Guo H. Composites Course. Beijing: Higher Education Press, 2010
(贾成厂, 郭宏. 复合材料教程. 北京: 高等教育出版社, 2010)
- [26] Wei L, Yao G C, Zhang X M, et al. Preparation of foam aluminium by powder metallurgy process. *J Northeastern Univ Nat Sci*, 2003, 24(11): 53
(魏莉, 姚广春, 张晓明, 等. 粉末冶金法制备泡沫铝材料. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(11): 53)
- [27] Neville B P, Rabiei A. Composite metal foams processed through powder metallurgy. *Mater Des*, 2008, 29(2): 388
- [28] Cho Y J, Lee T S, Lee W, et al. Preparation and characterization of iron matrix syntactic foams with glass microspheres via powder metallurgy. *Met Mater Int*, 2019, 25(3): 794
- [29] Akinwekomi A D, Adebisi J A, Adediran A A. Compressive characteristics of aluminum-fly ash syntactic foams processed by microwave sintering. *Metall Mater Trans A*, 2019, 50(9): 4257
- [30] Wang Q P, Min F F, Wu Y C, et al. Microstructures and friction and wear properties of fly ash/Al-Mg alloy composites. *Chin J Nonferrous Met*, 2012, 22(4): 1039
(王庆平, 闵凡飞, 吴玉程, 等. 粉煤灰/铝-镁合金复合材料的微观组织及摩擦磨损性能. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1039)
- [31] Lehmkus D, Weise J, Baumeister J, et al. Quasi-static and dynamic mechanical performance of glass microsphere- and cenosphere-based 316L syntactic foams. *Proc Mater Sci*, 2014, 4: 383
- [32] Sudarshan, Surappa M K. Synthesis of fly ash particle reinforced A356 Al composites and their characterization. *Mater Sci Eng A*, 2007, 480(1-2): 117
- [33] Manakari V, Parande G, Doddamani M, et al. Evaluation of wear resistance of magnesium/glass microballoon syntactic foams for engineering/biomedical applications. *Ceram Int*, 2019, 45(7): 9302
- [34] Banhart J. Aluminium foams for lighter vehicles. *Int J Veh Des*, 2005, 37(2-3): 114

(上接第 376 页)

- [13] Huang Q Y, Li H K. *High Temperature Alloy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000
(黄乾尧, 李汉康. 高温合金. 北京: 冶金工业出版社, 2000)
- [14] Shao W D, Tong C S, Zhuang W. Composition design of a new cobalt base superalloy and its microstructure and properties. *Mater Mechan Eng*, 2005, 29(9): 41
(邵卫东, 童潮山, 庄伟. 新型钴基高温合金成分设计及其组织与性能. 机械工程材料, 2005, 29(9): 41)
- [15] Lei Y Y, Yao Z K, Ning Y Q, et al. Improvement of forging heat treatment on inhomogeneous deformation of P/M superalloy. *Rare Met Mater Eng*, 2012, 41(9): 1689
(雷应毅, 姚泽坤, 宁永权, 等. 热处理对粉末高温合金不均匀变形的改善作用. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9): 1689)
- [16] Zou J W, Wang W X. Development and application of P/M superalloy. *J Aeron Mater*, 2006, 26(3): 244
(邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金研究进展与应用. 航空材料学报, 2006, 26(3): 244)