

# 金属空心球复合材料重力铸造工艺研究

亓 昌<sup>1,2</sup>, 杨孟欣<sup>1,2</sup>, 于 晨<sup>1,2</sup>, 崔丽萍<sup>1,2</sup>, 杨 姝<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学汽车工程学院 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

(2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315016)

**摘 要:** 基于对金属空心球复合材料的结构分析, 采用金属型重力铸造法制备金属空心球复合材料。介绍了金属空心球复合材料金属型重力铸造工艺流程, 并设计了一种成本低廉、简易成型、且能多次使用的金属型模具, 且对金属空心球复合材料进行了实验试制及材料验证。结果表明, 采用金属型重力铸造法能够制备出孔壁结构完整且孔洞随机分布的金属空心球复合材料, 能实现空心球单一设计与梯度设计; 金属空心球复合材料基体与空心球壁组织较为致密, 且形成了厚度为 25~30  $\mu\text{m}$  的界面层; 金属空心球复合材料的应力-应变曲线具有明显的弹性阶段、塑性平台阶段和致密化阶段, 且采用空心球梯度设计的金属空心球复合材料相较于空心球单一设计的金属空心球复合材料, 其基本力学性能有明显的提升。最后, 与传统的闭孔泡沫铝材料进行了对比分析, 金属空心球复合材料整体稳定性更高, 吸能效果更强。

**关键词:** 金属空心球复合材料; 重力铸造; 模具设计; 铸造工艺; 实验验证

**中图分类号:** TG146. 21; TG249. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)05-0420-09

**引用格式:** 亓昌, 杨孟欣, 于晨, 等. 金属空心球复合材料重力铸造工艺研究[J]. 中国材料进展, 2023, 43(5): 420-428.

QI C, YANG M X, YU C, *et al.* Investigation on Gravity Casting Process of Metallic Hollow Sphere Composites[J]. Materials China, 43(5): 420-428.

## Investigation on Gravity Casting Process of Metallic Hollow Sphere Composites

QI Chang<sup>1,2</sup>, YANG Mengxin<sup>1,2</sup>, YU Chen<sup>1,2</sup>, CUI Liping<sup>1,2</sup>, YANG Shu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Ningbo Research Institute, Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

**Abstract:** Based on the structural analysis of metal hollow sphere composites, metal hollow sphere composites were prepared by metal mold gravity casting. The technological process of metal mold gravity casting of metal hollow sphere composite is introduced, and a metal mold with low cost, simple molding and multiple use is designed. The experimental trial production and material verification of metal hollow sphere composite are carried out. The results show that the metal hollow sphere composite with complete pore wall structure and random distribution of pores can be prepared by metal mold gravity casting method, and the single design and gradient design of hollow spheres can be realized. The matrix and hole wall structure of metal hollow sphere composites are relatively dense, and the thickness is about 25~30  $\mu\text{m}$  interface layer. The stress-strain curve of metal hollow sphere composite has obvious elastic stage, plastic plateau stage and densification stage, and the metal hollow sphere composite material designed with hollow sphere gradient has significantly improved its basic mechanical properties compared to the metal hollow sphere composite material designed with a single hollow sphere. Finally, compared

with the traditional closed cell aluminum foam, the metal hollow spheres composite has higher overall stability and stronger energy absorption.

**Key words:** hollow sphere reinforced composites; gravity casting; mold design; casting process; experimental verification

收稿日期: 2022-05-14 修回日期: 2022-09-10

基金项目: 国防科技创新特区计划项目(19-H863-03-LZ-001-005-01); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(DUT20LAB132, DUT21GF203)

第一作者: 亓 昌, 男, 1978 年生, 教授, 博士生导师,  
Email: qichang@dlut.edu.cn

通讯作者: 杨 姝, 女, 1978 年生, 副教授, 硕士生导师,  
Email: yangshu@dlut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202205009

## 1 前 言

泡沫金属是一类重要的多功能轻质多孔材料, 受到

研究者的广泛关注。近年来,为提高传统泡沫金属的细观胞元均匀性和宏观各向同性特性,结合颗粒增强金属基复合材料的优点,国内外学者致力于新型泡沫金属材料设计制备,并取得了突破性进展<sup>[1-4]</sup>。其中,金属空心球复合材料(metallic hollow sphere composites, MHSC)是一种将预制金属空心球和金属基体经特定工艺复合制备而成的具有独特结构和优异性能的结构功能一体化泡沫金属材料。相比于采用传统熔体发泡法制备的单一材质泡沫金属,金属空心球复合材料具有更优的尺寸稳定性和机加工性能,能保证胞孔尺寸的均一性和胞孔分布的均匀性,有效克服了传统泡沫金属材料各向异性的缺点<sup>[5]</sup>。此外,作为一类新型的泡沫金属材料,金属空心球复合材料还具有较大的孔隙率、比表面积、比强度、比刚度以及良好的缓冲吸能、减振降噪、隔热隔音等特性<sup>[4, 6-10]</sup>,可广泛应用于汽车工业、航空航天、船舶海洋以及军事装备制造等军民领域<sup>[11, 12]</sup>。

目前,金属空心球复合材料的制备方法主要包括压力渗流法<sup>[3, 13-15]</sup>、粉末冶金法<sup>[5, 16]</sup>和重力铸造法<sup>[6, 9, 17]</sup>。其中,压力渗流法所需时间相对较短,但由于增加额外压力,整体工艺复杂,设备要求较高,不适合大批量生产;采用粉末冶金法制备金属空心球复合材料需严格控制烧结温度、烧结压力及烧结时间等工艺参数,参数设置不当极易使制品产生较大缺陷,导致产品的力学性能不足,难以达到应用指标;相比之下,重力铸造法不用施加额外压力,工艺设备简单,铸件质量稳定,制备成本较低,更适合金属空心球复合材料的工业化批量生产。围绕金属空心球复合材料的重力铸造工艺,国外已从模具设计<sup>[18]</sup>、材料缺陷控制<sup>[19]</sup>、工艺参数优化<sup>[20]</sup>等方面开展了较多研究,而国内由于起步较晚,目前尚未有采用重力铸造法制备金属空心球复合材料的公开报道。

本研究针对钢质空心球增强铝合金基复合材料的低成本高性能制备,自主设计开发了金属空心球复合材料金属型重力铸造模具和制备工艺流程;在此基础上,以毫米级钢质空心球为增强体,以 ZL101A 铝合金为基体,制备了钢质空心球铝合金基复合材料试样,并分别采用金相显微镜和场发射电子探针对所制备样件的细观形貌

和金相组织进行了材料表征,为金属空心球复合材料的高性能批量化制备提供基础数据和技术参考。

## 2 实验

### 2.1 金属空心球复合材料结构及工艺分析

金属空心球复合材料以轻质金属作为材料基体,空心球作为增强体在基体中随机分布,其结构示意图如图 1 所示,金属基体为空心球提供骨架支撑,空心球增强体为金属基体增加强度、改善性能。

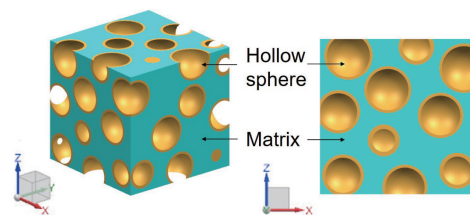


图 1 金属空心球复合材料结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metallic hollow sphere composites

采用铸造法制备金属空心球复合材料所需空心球多为钢质空心球,所需基体为轻质金属,一般多为铝合金<sup>[21]</sup>。由于钢质空心球熔点远高于基体金属熔点,故采用重力铸造工艺进行制备时,是将基体金属溶液填充至空心球间的空隙,待基体金属溶液凝固冷却后得到金属空心球复合材料铸件。由于重力铸造过程中无法营造真空环境,所以本铸造实验没有将氧化问题作为重要的研究内容,但在铸造过程中,需要通过模具设计、材料保护预处理以及人工操作等手段尽可能降低氧化程度。

### 2.2 实验原材料

本实验中选用的原材料为冷轧钢板(steel plate cold rolled commercial, SPCC)空心球、316L 不锈钢空心球和 ZL101A 铝合金。这 2 种钢质空心球的化学成分和尺寸参数见表 1,其制造过程是将一定厚度的薄钢板经过冲压得到一定直径的空心半球组件,再对 2 个半球组件进行焊接,即得到金属空心球样件,随后对金属空心球进行表面打磨处理,密封保存备用。ZL101A 铝合金的化学成分见表 2。

表 1 2 种钢质空心球化学成分和尺寸参数

Table 1 Chemical composition and dimensional parameters of steel hollow spheres

Hollow sphere	Chemical composition/wt%	Dimension parameters		
		Outer diameter/mm	Wall thickness/mm	Mass/g
SPCC	≤0.60 Mn, ≤0.15 C, ≤0.1 P, ≤0.03 Si, ≤0.025 S, bal. -Fe	8.27	0.5	0.73
316L	16~18 Cr, 12~15 Ni, 2~3 Mo, ≤2 Mn, ≤1 Si, ≤0.03 C, bal. -Fe	14.80	0.65	3.23

表 2 ZL101A 铝合金化学成分 (w / %)

Table 2 Chemical composition of ZL101A aluminum alloy

Element	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Zr	Zn	Al
Content	6.5~7.5	0.25~0.45	0.08~0.2	≤0.2	≤0.1	≤0.2	≤0.1	Bal.

## 2.3 金属型模具设计

### 2.3.1 模具结构

基于金属溶液沿反重力方向自下而上浇注的设想,设计四边棱台式组合模具。该组合模具由浇口料斗、铸模型腔和底座 3 部分组成,其中铸模型腔分浇道和成型腔 2 部分,组合模具模型如图 2 所示。

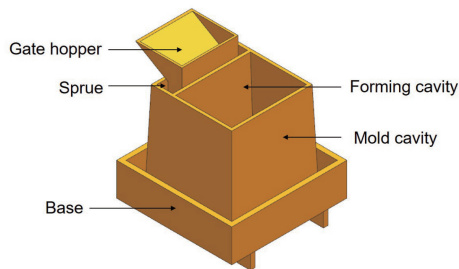


图 2 组合模具的三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of combined mold

浇注系统采用简洁式底注式浇注系统,包括浇口料斗(浇口杯)、直浇道和内浇口,其中直浇道是指铸模型腔的浇道,内浇口由铸模型腔中成型腔与浇道之间的隔板与底座上表面组成,如图 3 所示。从补缩和通道畅通角度考虑,浇注系统直浇道截面面积应大于内浇口截面面积,且以缩短路径和减少金属溶液消耗量为主要原则,一方面节约能源和原材料,另一方面缩短铝合金溶液的充型时间。

### 2.3.2 模具设计相关参数与技术要求

#### (1) 模具材料要求

考虑到模具在 500~800 °C 下多次作业,模具材料要保证具有良好的耐热性、导热性以及机械可加工性;要保证不能与喷涂在模具内壁的脱模剂相反应或者被其腐

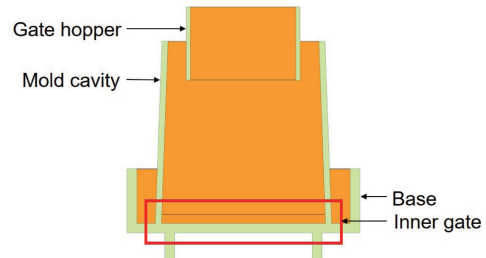


图 3 内浇口示意图

Fig. 3 Schematic diagram of inner gate

蚀破坏<sup>[22]</sup>;要具有较小的表面粗糙度,不能影响铝合金溶液在模具中的流动效果。本实验中模具选材为 304 不锈钢和 310S 不锈钢,铸模型腔和底座的选材为 304 不锈钢,浇口料斗选材为 310S 不锈钢。

#### (2) 模具内浇口高度

模具内浇口高度为隔板与底座内腔上表面距离,用  $h_b$  表示,则  $h_b$  应满足式(1):

$$\frac{1}{2}d_{hs} \leq h_b \leq \frac{2}{3}d_{hs} \quad (1)$$

式中  $d_{hs}$  为最小空心球外径,单位 mm。本次铸造实验中使用的钢质空心球尺寸参数见表 1,故  $h_b$  值可取 5 mm。

#### (3) 模具间隙

模具间隙是指铸模型腔的下表面与底座上表面的装配间隙。若间隙过大,易导致铝合金溶液在浇注过程中大量外溢,则无法完全填充钢质空心球球间空隙,影响铸件品质。本实验中模具间隙小于 0.1 mm。

## 2.4 金属型重力铸造工艺流程

金属型重力铸造法制备金属空心球复合材料流程可见图 4。具体的操作步骤如下。

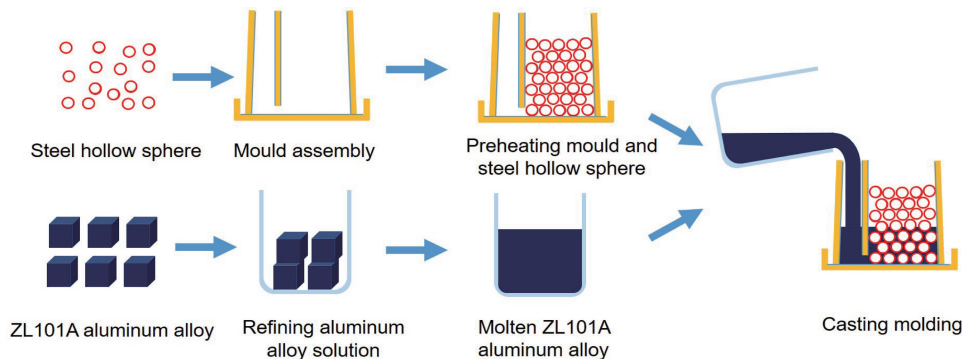


图 4 金属型重力铸造法制备金属空心球复合材料流程图

Fig. 4 Flow chart of metallic hollow sphere composites prepared by metal mold gravity casting

(1)将若干钢质空心球和铝合金块,连同浇口料斗、铸模型腔和底座置于盛有稀释后的碱性清洗剂的超声波清洗机内清洗,清水漂洗后烘干备用。

(2)在浇口料斗、铸模型腔以及底座的内表面喷涂脱模剂,将铸模型腔置于底座正中位置,并在铸模型腔外边与底座内边之间填充耐火棉。

(3)将步骤(1)的钢质空心球填充到步骤(2)模具成型腔中,并在成型腔所填钢质空心球的上表面覆盖一层不锈钢过滤网,用于固定钢质空心球,同时将浇口料斗置于浇道顶端,如图5所示。

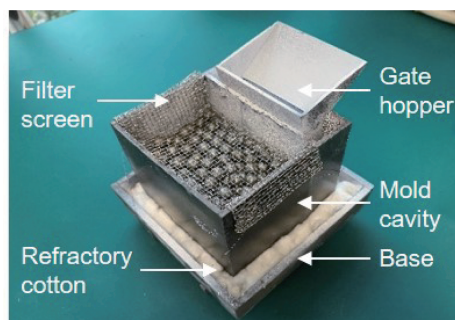


图5 模具装配与空心金属球填充

Fig. 5 Mold assembly and hollow metal sphere filling

(4)按照图6设置的分段加热及保温程序分别将装有铝合金块的坩埚放入熔铝炉中加热熔化,将装有钢质空心球的组合模具放入马弗炉中预热。

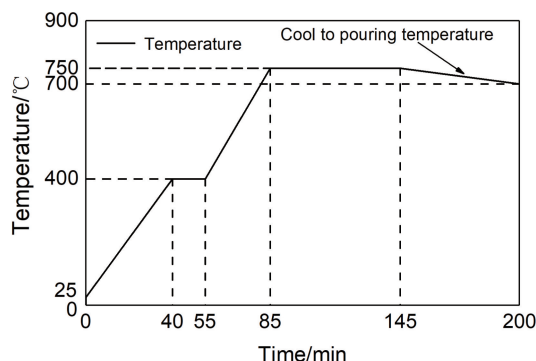


图6 分段加热及保温程序

Fig. 6 Temperature rise and insulation procedure

(5)将熔融的铝合金溶液在指定的浇注温度下自浇口料斗浇入,逐层填充空心球间的空隙,直到完全浸没成型腔中所有空心球后停止浇注。

(6)待模具空冷至室温,取出铸件,并切除浇道部分,得到金属空心球复合材料铸件。

在步骤(3)中,向成型腔内沿着某一方向放置不同外径的空心球,其余操作步骤不变,能得到空心球梯度

分布的金属空心球复合材料铸件。

## 2.5 金属型重力铸造工艺参数

### 2.5.1 浇注温度

浇注温度过高或过低直接影响铸件的成型质量。若浇注温度过高,铸件易出现缩孔、缩松以及晶粒组织粗大等缺陷;若浇注温度过低,铸件易形成浇不足、冷隔以及缩松等缺陷<sup>[23]</sup>。本次实验浇注温度为 $(700 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。

### 2.5.2 铝合金溶液浇注速度

铝合金溶液浇注速度应做到先慢、后快、再慢<sup>[24]</sup>。先慢利于型腔中气体的排出,避免铝合金溶液冲击飞溅,预防二次夹杂物的形成。后快可使金属液尽快充满成型腔,避免形成冷隔。再慢是防止浇注末期金属液溢出型腔之外。整个浇注过程中液流要平稳连续,一来减少铸件产生气孔、夹渣、氧化夹杂等缺陷,二来细化铸件晶粒,提高铸件力学性能。根据实际经验,为防止金属液在完成充型前失去流动性,浇注时间设定在20~25 s范围内,按式(2)计算金属液在成型腔中的平均上升速度 $v_{\text{rise}}$ (mm/s):

$$v_{\text{rise}} = \frac{h}{t} \quad (2)$$

式中, $h$ 为成型腔的高度,mm; $t$ 为浇注时间。本次铸造实验中, $h$ 取100 mm,即铸模型腔的高度,经计算 $v_{\text{rise}}$ 可取4~5 mm/s。

### 2.5.3 脱模剂使用

采用美树605脱模剂喷涂组合模具内表面,涂层厚度为0.2~0.3 mm,目的是减轻高温铝合金溶液对模具的热冲击和降低对模具内表面的冲刷作用,并减轻铸件对模具的磨损,延长模具使用寿命。其次,脱模剂能起到润滑效果,可减小模具与铸件间的摩擦力,使铸件更易于脱模。

## 3 结果与讨论

按上述的重力铸造流程进行实际生产,得到2种金属空心球复合材料铸件。利用线切割对所得铸件进行加工,得到对应的MHSC材料样件,2种样件的组成部分详见表3。其中空心球梯度设计是使用SPCC空心球和316L不锈钢空心球2种空心球尺寸沿着竖直方向梯度分布来作为增强体,进而可在金属空心球复合材料内部沿着某一方向改变内部胞孔尺寸的大小。该设计是一种基于尺寸和材料性能的综合梯度设计方法,进而能在一定程度上改变金属空心球复合材料的能量吸收、抗压缩、抗冲击等性能。图7为采用金属型重力铸造工艺制备的钢质空心球铝合金基复合材料样件。



表 3 2 种金属空心球复合材料(MHSC)样件的组成部分

Table 3 Components of two metallic hollow sphere composites(MHSC) sample

Sample	Matrix	Hollow sphere arrangement	Reinforcement
MHSC sample 1	ZL101A aluminium alloy	Random stacking with hollow sphere single design	SPCC steel hollow sphere
MHSC sample 2	ZL101A aluminium alloy	Random stacking with hollow sphere gradient design	SPCC steel hollow sphere, 316L stainless steel hollow sphere



图 7 钢质空心球铝合金基复合材料样件

Fig. 7 Steel hollow sphere aluminum alloy matrix composite sample

### 3.1 宏观形貌

将金属空心球复合材料样件进行机械切割,获取空心球单一设计和梯度设计 2 种 MHSC 剖面宏观形貌。其中空心球单一设计是使用单一的 SPCC 空心球随机分布来

充作增强体,而空心球梯度设计是使用 SPCC 空心球和 316L 不锈钢空心球 2 种空心球尺寸沿着某一方向梯度分布来作为增强体,进而在金属空心球复合材料内部沿着某一方向改变内部胞孔尺寸的大小,是一种基于尺寸和材料性能的综合梯度设计方法。图 8a 为 MHSC(空心球单一设计)横截面的宏观形貌(样品 1),图 8b 为 MHSC(空心球梯度设计)横截面的宏观形貌(样品 2),其中 316L 不锈钢空心球位于上方,SPCC 钢空心球位于下方。2 种样件中的空心球均匀分布于基体中,且保持着较好的球形结构,球壁厚度均匀。由于样件截面切割位置为随机选择,因此样件截面中空心球排布的疏密程度不同。因为铝合金溶液在模具中流动填充的压力有限,当 2 个空心球紧密接触时,球间的分子张力过大,铝合金溶液难以完全填充 2 个空心球之间的间隙,故出现如图 8a 中部分空心球之间存在少量间隙的现象。

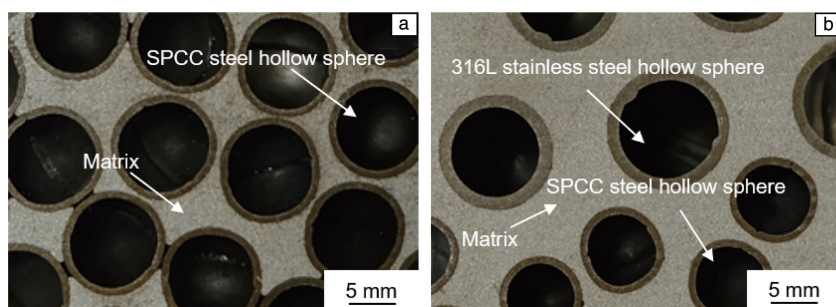


图 8 2 种金属空心球复合材料(MHSC)的断面抛光 OM 照片:(a)MHSC 材料(空心球单一设计), (b)MHSC 材料(空心球梯度设计)

Fig. 8 Cross sectional OM images of two MHSC: (a) MHSC (hollow sphere single design), (b) MHSC (hollow sphere gradient design)

### 3.2 金相组织

采用 JXA-8530F Plus 型场发射电子探针(FEEM)观测 MHSC 材料的微观形貌。图 9 为 MHSC 材料中 2 种球基界面的显微组织照片,其中深灰色部分为 ZL101A 铝合金基体,中灰色过渡部分为基体与空心球的界面层,白灰色部分为空心球壁。由于空心球材质不同,2 种球基界面二次电子像中的界面层与空心球壁表现的衬度不同。基体与空心球壁均比较致密,基体内部无明显孔洞。空心球与铝合金基体之间形成了厚度约 25~30  $\mu\text{m}$  的界面层,表明基体与空心球结合良好。但由于部分空心球之间存在少量间

隙,导致界面层在部分空心球外围分布不均匀。

使用电子探针线分析法观测所制备的 2 种 MHSC 材料的球基界面,定性判断界面区域元素含量的变化,线扫描方向均为基体-界面层-空心球壁。ZL101A 铝合金基体与 SPCC 钢空心球界面线分析如图 10 所示,由图 10b 可知,界面层处主要富集了 Al, Fe 和 Si 这 3 种元素,其中 Al 元素自基体一侧至界面层一侧含量有所减少,而 Fe 元素从界面层一侧至空心球壁一侧含量有明显的增加,说明 Al 和 Fe 元素分别是由界面层两侧的基体和空心球壁向界面层发生了扩散,此外界面层处的 Si 元素含量均

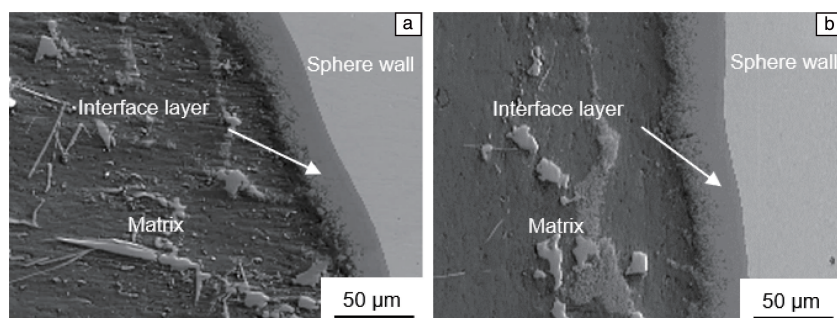


图9 2种MHSC材料基体与球体界面显微组织FEEM照片: (a) ZL101A 铝合金基体与 SPCC 钢空心球界面二次电子像, (b) ZL101A 铝合金基体与 316L 不锈钢空心球界面二次电子像

Fig. 9 FEEM images of the interface between matrix and sphere of two kinds of MHSC: (a) secondary electron image of interface between ZL101A aluminum alloy matrix and SPCC steel hollow sphere, (b) secondary electron image of interface between ZL101A aluminum alloy matrix and 316L stainless steel hollow sphere

高于基体和空心球壁区域,表明 Si 元素在界面层处富集。观察到基体一侧的 C, Si 和 Fe 元素曲线皆存在明显的波动,在基体内部 C, Si 和 Fe 元素分布不均匀,说明在浇注及冷却凝固过程中,铝合金基体由于固熔体不平衡结晶发生了轻微的晶内偏析,而空心球壁一侧的 Fe, C, Si 等元素曲线波动不明显,表明空心球壁一侧元素成分均匀,不存在偏析现象。

ZL101A 铝合金基体与 316L 不锈钢空心球界面的

EDS 线扫描分析结果如图 11,与 ZL101A 铝合金基体与 SPCC 钢空心球界面线分析相似,界面层处同样主要由 Al, Fe 和 Si 这 3 种元素构成,根据图 11b 的线分析元素曲线也可以推测出界面层处的 Al 和 Fe 元素分别由基体和空心球壁中 Al 和 Fe 元素的扩散所得,同时 Si 元素在界面层处富集。最后,观察图 10 和 11 中的 O 元素曲线,可知 2 种界面的 O 元素含量都较少,并在整个基体-界面层-空心球壁区域无明显波动,说明在铸造过程中铝合金

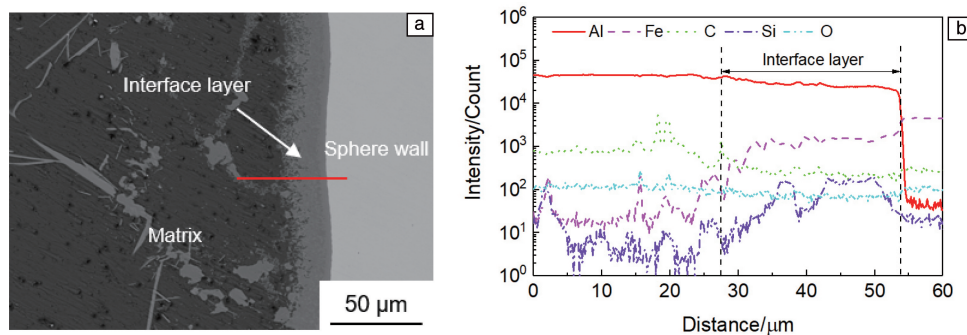


图10 ZL101A 铝合金基体与 SPCC 钢空心球界面 EDS 线扫描分析: (a) 线分析位置, (b) 线分析结果

Fig. 10 EDS line analysis of interface between ZL101A aluminum alloy matrix and SPCC steel hollow sphere: (a) line analysis location, (b) line analysis results

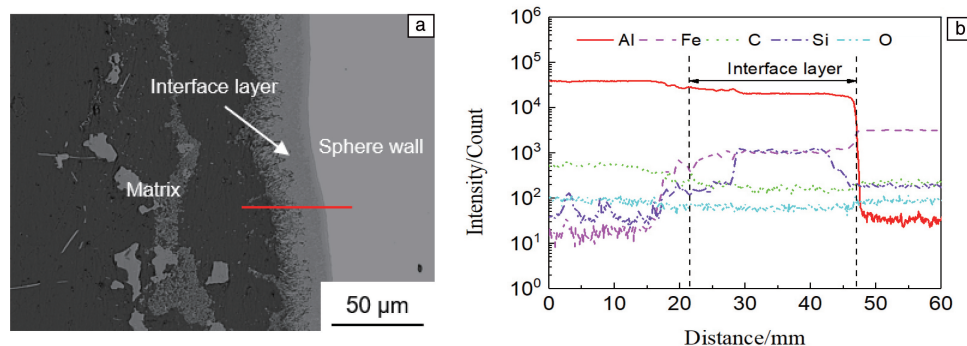


图11 ZL101A 铝合金基体与 316L 不锈钢空心球界面 EDS 线扫描分析: (a) 线分析位置, (b) 线分析结果

Fig. 11 EDS line analysis of interface between ZL101A aluminum alloy matrix and 316L stainless steel hollow sphere: (a) line analysis location, (b) line analysis results

溶液的浇注速度选择合理,且模具封闭性良好,浇注前期基本排尽了模具型腔的空气,界面层处被氧化的程度轻。

此外,2种球基界面的左侧边界轮廓均不规整,可见在增强体和基体之间还存在着因球基界面摩擦作用的机械咬合<sup>[25]</sup>,因此界面层的形成既有机械结合也有扩散反应结合,是一种在混合结合机制作用下形成的第三相。

### 3.3 压缩性能

参照国际标准 ISO 13314:2011《多孔状和蜂窝状金属压缩试验》,利用 YDL-1000 电液伺服万能试验机对制备的 2 种 MHSC 材料进行准静态压缩性能测试,测试温度为室温,压缩速率为 1 mm/min。

图 12 是 2 种 MHSC 材料的应力-应变曲线,可见金属空心球复合材料同泡沫金属材料一样,均具有弹性阶段、塑性平台阶段和致密化阶段 3 个典型阶段,其中弹性阶段(应变 0~2% 范围内)跨度范围较短,应力随着应变近似线性增长;塑性平台阶段(应变 2%~50% 范围内)应力随着应变的增加而缓慢上升,曲线无明显波动;致密化阶段(应变大于 50%)应力随着应变的增加而快速上升,材料逐渐被压实,曲线出现轻微锯齿状波动。测得 MHSC 材料的基本力学性能如表 4,对比 2 种 MHSC 材料

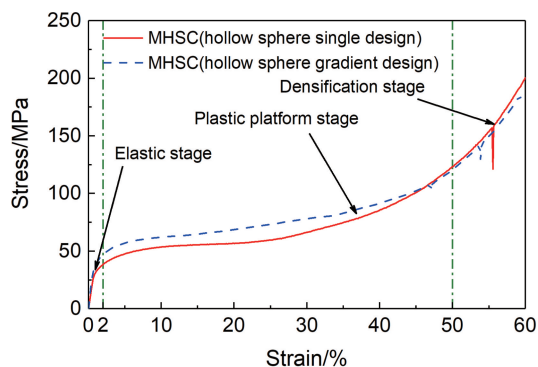


图 12 2 种 MHSC 材料压缩应力-应变曲线

Fig. 12 Compression stress-strain curves of two MHSC

表 4 MHSC 材料的基本力学性能

Table 4 Basic mechanical properties of MHSC

Sample	MHSC(hollow sphere single design)	MHSC(hollow sphere gradient design)
Young's modulus/GPa	4.16	6.05
Compressive strength/MPa	30.84	35.8
Platform stress/MPa	68.65	76.69

的基本力学性能参数,空心球梯度设计的 MHSC 材料相比于空心球单一设计的 MHSC 材料的压缩性能更优越。

对比 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料的应力-应变曲线,如图 13 所示,可见 7050 铝合金基体泡沫铝、纯铝基体泡沫铝以及 6061 铝合金基体泡沫铝应力-应变曲线进入到塑性平台阶段后应力均随着应变在一定范围内存在明显的波动,表明闭孔泡沫铝材料在抵抗压缩变形时内部胞孔坍塌不均匀,吸能不平稳。而 MHSC 材料在塑性平台阶段应力平缓增长,无明显波动,且平台应力值为闭孔泡沫铝的数倍以上,这表明用空心球作为内部胞孔的 MHSC 材料能明显改善非均匀变形现象,且整体结构的稳定性高于闭孔泡沫铝,吸能更平稳。

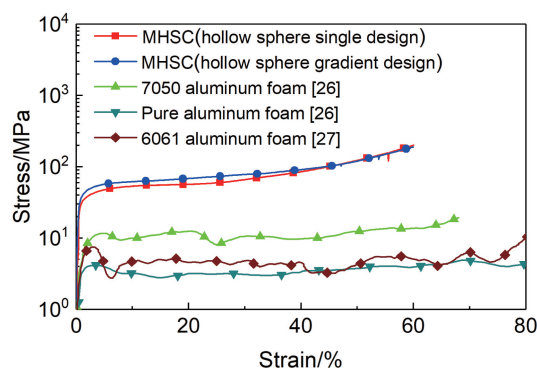


图 13 MHSC 材料和闭孔泡沫铝材料应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves of MHSC and closed cell aluminum foam

泡沫材料的吸能特性主要取决于材料应力-应变曲线较宽的塑性平台以及相对较高的平台应力<sup>[28]</sup>。图 14 给出了 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料单位体积吸能与应变曲线,可知 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料的单位体积吸能能力均随着应变量的增加而增加,其中 MHSC 材料在任意应变量下的单位体积吸能均数倍高于闭孔泡沫铝材料。

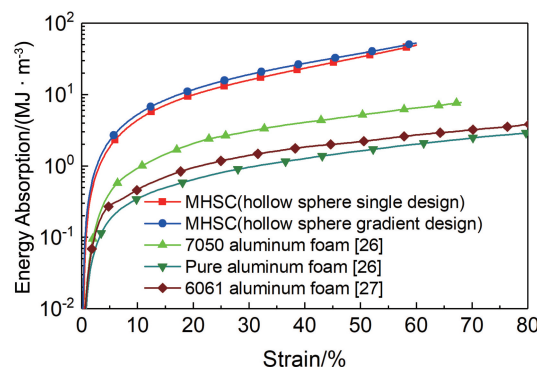


图 14 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料单位体积吸能能力对比

Fig. 14 Comparison of energy absorption capacity between MHSC and closed cell aluminum foam



图 15 给出了 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料比吸能与应变曲线, 可知 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料的比吸能均随着应变量的增加而增加, 其中 MHSC 材料在任意应变变量下的比吸能同样均高于闭孔泡沫铝材料数倍。表 5 为 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料的吸能参数, 通过定量比较, MHSC 材料相比于闭孔泡沫铝材料在吸能缓冲方面有更广阔的应用前景。

## 4 结 论

(1) 采用自主设计的四边棱台式组合模具可以制备出空心球单一设计与梯度设计的金属空心球复合材料, 所用模具结构简单、易于加工和装配、可重复使用、可

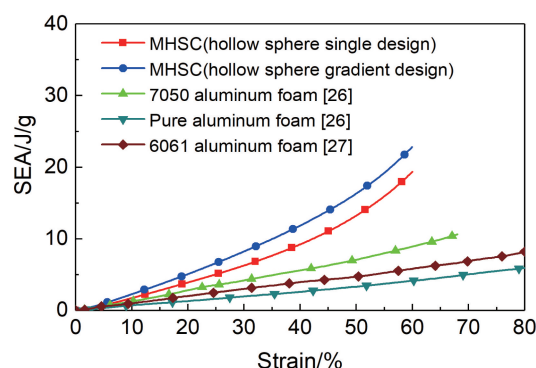


图 15 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料比吸能对比

Fig. 15 Comparison of specific energy absorption between MHSC and closed cell aluminum foam

表 5 MHSC 材料与闭孔泡沫铝材料的吸能参数

Table 5 Energy absorbing parameters of MHSC and closed cell aluminum foam

Sample	MHSC (hollow single sphere design)	MHSC (hollow sphere gradient design)	7050Al foam <sup>[26]</sup>	Pure aluminum foam <sup>[26]</sup>	6061Al foam <sup>[27]</sup>
Matrix	ZL101A aluminum alloy	ZL101A aluminum alloy	7050 aluminum alloy	Pure aluminum	6061 aluminum alloy
Reinforcement	SPCC steel hollow sphere	SPCC steel hollow sphere, 316L stainless steel hollow sphere	—	—	—
Energy absorption at 50% strain/(MJ·m <sup>-3</sup> )	33.73	37.86	5.31	1.67	2.23
SEA at 60% strain/(J·g <sup>-1</sup> )	19.29	22.81	8.93	4.15	5.84

Note: SEA—specif energy absorption, 比吸能

设计性强, 为金属空心球复合材料的制备研究提供了可行方案。

(2) 重力铸造法制备的金属空心球复合材料, 其内部无宏观缺陷, 空心球在基体中随机分布, 且保持着完整的球形结构。二次电子像显示基体与空心球壁组织较为致密, 并在机械结合和扩散反应结合的混合机制作用下形成了界面层, 该界面层主要由 Al, Fe 和 Si 这 3 种元素组成, 界面层厚度约为 25~30 μm。

(3) 金属空心球复合材料的应力-应变曲线具有明显的弹性阶段、塑性平台阶段和致密化阶段。对比弹性模量、压缩强度、平台应力、单位体积能量吸收能力以及比吸能等参数, 结果表明, 空心球梯度设计的 MHSC 材料相比于空心球单一设计的 MHSC 材料的压缩性能更具有优势。

(4) 相比于传统的闭孔泡沫铝材料, MHSC 材料在塑性平台阶段的应力变化更平缓, 且平台应力值更高; 整体结构的稳定性更高; 吸能更平稳, 单位体积吸能和比吸能更强, 在缓冲吸能、高速冲击等应用场景中更具有优势。

## 参考文献 References

- [1] S-DE-LA-MUELA A M, CAMBRONERO L E G, RUIZ-ROMÁN J M. Metals[J], 2020, 10(1): 149.
- [2] SZLANCSIK A, NORBERT ORBULOV I. Materials Science and Engineering: A[J], 2021, 827: 142081.
- [3] WANG CH, GUO C H, JIANG F C. Science and Engineering of Composite Materials[J], 2021, 28(1): 478-488.
- [4] MARX J, RABIEI A. Advanced Engineering Materials[J], 2017, 19(11): 1600776.
- [5] 果春焕, 邵帅齐, 牛建民, 等. 中国材料进展[J], 2023, 42(6): 482-491.  
GUO C H, SHAO S Q, NIU J M, et al. Materials China[J], 2023, 42(6): 482-491.
- [6] 徐大召, 孟令刚, 杨春峰, 等. 中国材料进展[J], 2022, 41(11): 880-890.  
XU D Z, MENG L G, YANG C F, et al. Materials China[J], 2022, 41(11): 880-890.
- [7] MARX J, RABIEI A. Journal of Sandwich Structures & Materials[J], 2020, 23(8): 3773-3793.



- [8] YU T M, JIANG F C, ZHANG R P, *et al.* Composite Structures [J], 2021, 261: 113554.
- [9] 历长云, 杨二阔, 李雷, 等. 粉末冶金技术[J], 2020, 38(5): 383–390.  
LI C Y, YANG E K, LI L, *et al.* Powder Metallurgy Technology [J], 2020, 38(5): 383–390.
- [10] RABIEIA, KARIMPOUR K, JANSSENS M, *et al.* Fire and Materials[J], 2021, 45(3): 379–386.
- [11] MARX J, PORTANOVA M, RABIEI A. Composite Structures[J], 2018, 194: 652–661.
- [12] MARX J, PORTANOVA M, RABIEI A. Composite Structures[J], 2019, 225: 111032.
- [13] WANG CH, JIANG F C, SHAO S Q, *et al.* Metals[J], 2020, 10(8): 1047.
- [14] ORBULOV I N, SZLANCSIK A. Advanced Engineering Materials [J], 2018, 20(5): 1700980.
- [15] WANG C H, GUO C H, QIN R N, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2022, 895: 162658.
- [16] WANG CH, JIANG F C, QIN R, *et al.* Journal of Materials Engineering and Performance[J], 2021, 31(2): 1540–1549.
- [17] PAN L W, RAO D W, YANG Y W, *et al.* Journal of Porous Materials[J], 2020, 27(4): 1127–1137.
- [18] DI FRATTA C, SUN Y, CAUSSE P, *et al.* Journal of Composites Science[J], 2020, 4(1): 11.
- [19] SZLANCSIK A, KATONA B, KAROLY D, *et al.* Materials[J], 2019, 12(4): 574.
- [20] THIYAGARAJAN R, SENTHIL KUMAR M. Materials and Manufacturing Processes[J], 2021, 36(12): 1333–1351.
- [21] SHUKLA M, DHAKAD S K, AGARWAL P, *et al.* Materials Today: Proceedings[J], 2018, 5(2): 5830–5836.
- [22] 肖遥, 李东升, 吉康, 等. 复合材料学报[J], 2022, 39(3): 907–925.  
XIAO Y, LI D S, JI K, *et al.* Acta Materialiae Compositae Sinica[J], 2022, 39(3): 907–925.
- [23] 施文鹏, 王家宣, 胡洪, 等. 特种铸造及有色合金[J], 2018, 38(6): 629–631.  
SHI W P, WANG J X, HU H, *et al.* Special Casting & Nonferrous Alloys[J], 2018, 38(6): 629–631.
- [24] 王海涛, 任荣, 冯业文, 等. 金属加工(热加工)[J], 2020(2): 81–83.  
WANG H T, REN R, FENG Y W, *et al.* MW Metal Forming[J], 2020(2): 81–83.
- [25] 王微, 陈武, 彭德林. 材料科学与工程学报[J], 2021, 39(1): 154–159.  
WANG W, CHEN W, PENG D L. Journal of Materials Science and Engineering[J], 2021, 39(1): 154–159.
- [26] 闫畅, 宋绪丁, 荆传贺, 等. 材料导报[J], 2017, 31(18): 92–96+101.  
YAN C, SONG X D, JING C H, *et al.* Materials Reports[J], 2017, 31(18): 92–96+101.
- [27] 戴开达, 吴东旭, 张志成, 等. 北京理工大学学报[J], 2021, 41(6): 579–587.  
DAI K D, WU D X, ZHANG Z C, *et al.* Transactions of Beijing Institute of Technology[J], 2021, 41(6): 579–587.
- [28] 孙亚东, 周芸, 汪天尧, 等. 材料科学与工艺[J], 2019, 27(5): 44–51.  
SUN Y D, ZHOU Y, WANG T Y, *et al.* Materials Science and Technology[J], 2019, 27(5): 44–51.

(编辑 张雨明)