

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.008

环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料制备及性能

王瑛¹, 段景宽², 杨小瑞³, 刘引烽³, 高缘⁴, 姜涛¹, 杨开亮⁴, 赵远涛¹, 李文戈¹, 吴新锋⁴

(1. 上海海事大学商船学院, 上海 201306; 2. 宁波工程学院材料与化工学院, 浙江宁波 315211;

3. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 4. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 采用硅烷偶联剂 KH-550 改性空心玻璃微珠 (S38HS), 并通过旋转脱泡-浇注-模压成型法制备了环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料。研究了空心玻璃微珠表面处理、体积分数对复合浮力材料压缩强度和密度的影响。结果表明, 表面处理有利于改善环氧树脂和空心玻璃微珠之间的界面, 从而提高复合浮力材料的压缩强度。添加高体积分数的空心玻璃微珠有利于降低复合浮力材料的密度, 而材料的压缩强度随着空心玻璃微珠体积分数的增加而降低, 应该综合考虑空心玻璃微珠的含量, 以获取所需的密度和压缩强度。当空心玻璃微珠体积分数为 60% 时, 复合浮力材料的压缩强度和密度分别为 61.41 MPa 和 0.66 g/cm³。

关键词: 空心玻璃微珠; 环氧树脂; 复合材料; 浮力材料

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0044-05

Preparation and Properties of Epoxy Resin / Hollow Glass Microsphere Composite Buoyancy Materials

Wang Ying¹, Duan Jingkuan², Yang Xiaorui³, Liu Yinfeng³, Gao Yuan⁴, Jiang Tao¹, Yang Kaijiang⁴, Zhao Yuantao¹, Li Wenge¹, Wu Xinfeng⁴

(1. College of Merchant Marine, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. School of Material and Chemistry and Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. College of Marine Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Hollow glass microsphere (S38HS) were modified by silane coupling agent KH-550. Epoxy resin / hollow glass microsphere composite buoyancy materials were prepared by rotary defoaming-pouring-hot molding method. The effects of surface treatment and volume fraction of hollow glass microspheres on the compressive strength and the density of epoxy resin / hollow glass microsphere composite buoyancy materials were studied. The results show that the surface treatment is beneficial to improve the contact interface between the epoxy resin and the hollow glass microsphere, so as to improve the compressive strength of the composite buoyancy materials. Adding high volume fraction of hollow glass microsphere is conducive to reduce the density of the composite buoyancy materials, but its the compressive strength also decreases with the increasing volume fraction of hollow glass microsphere. Therefore, the volume fraction of hollow glass microsphere should be considered comprehensively to obtain the required density and compressive strength. When the volume fraction of hollow glass microsphere is 60%, the compressive strength and the density of composite buoyancy material are 61.41 MPa and 0.66 g/cm³, respectively.

Keywords: hollow glass microsphere; epoxy resin; composite; buoyancy material

海洋中蕴含着大量的石油、天然气、可燃冰等资源, 特别是进入 21 世纪以来, 这些资源的开发显得极为迫切。资源勘探和开发需要深海装备。为了保障深海装备和勘探人员的安全, 常常采用“无动力上浮技术”, 即在装备上安装轻质浮力材料进行安

全保障。具有高压压缩强度和低密度的复合浮力材料已经广泛应用于深海装备中, 如海洋探测系统、深海潜水设备、海洋石油勘探和其它深海开发设备等。低密度复合浮力材料主要被用来平衡勘探和开采设备重力和浮力。

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2017M611757), 上海市科技人才计划项目 (19QB1402200), 上海市科委“科技创新行动计划”地方院校能力建设 (19040501800)

通讯作者: 李文戈, 教授, 主要从事复合材料的研究 E-mail: wgli@shmtu.edu.cn

收稿日期: 2020-06-12

引用格式: 王瑛, 段景宽, 杨小瑞, 等. 环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(9): 44-48, 55.

Wang Ying, Duan Jingkuan, Yang Xiaorui, et al. Preparation and properties of epoxy resin / hollow glass microsphere composite buoyancy materials[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 44-48, 55.

深海装备用轻质浮力材料主要是由树脂和分散在树脂基体中的空心微球组成的复合材料。空心微球通常是由无机材料(如陶瓷和玻璃空心微珠)制备而成的微米级空心轻质材料,现阶段主要是3M公司生产的空心玻璃微珠。空心玻璃微珠是一种性能优良的超轻质纯白无机非金属材料,常用于深海浮力材料的牌号有S32, S38H和S38HS,均具有非常优越的力学性能。聚合物材料包括环氧树脂^[1-3]、酚醛树脂^[4-5]、聚氨酯^[6-7]、聚甲基丙烯酸甲酯^[8]、聚氯乙烯^[9-10]、聚乙烯^[11]和聚丙烯^[12]等材料。现阶段应用最广泛的树脂体系是环氧树脂-固化剂体系^[13-15]。

空心玻璃微珠的种类、体积分数及表面处理情况、树脂种类、制备工艺等因素均会对复合浮力材料的性能产生影响。笔者选用3M公司牌号为S38HS的空心玻璃微珠进行研究,首先对空心玻璃微珠进行表面处理,利用旋转脱泡-浇注-模压成型法制备环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料,研究空心玻璃微珠种类和体积分数对复合浮力材料压缩强度和密度的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚A型环氧树脂:Farbond LY1564-1A,无色透明状液体,25℃时黏度为1200~1400 mPa·s,密度为1.1~1.2 g/cm³,亨斯迈聚氨酯(中国)有限公司;

改性胺类固化剂:Farbond 3486-1B,淡黄色液体,25℃时黏度为10~20 mPa·s,密度为0.94~0.95 g/cm³,亨斯迈聚氨酯(中国)有限公司;

空心玻璃微珠:S38HS,密度为0.38 g/cm³,压缩强度为37.9 MPa,美国3M公司;

丙酮、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

去离子水:自制;

硅烷偶联剂:KH-550,青岛市海大化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子天平:FA1104N型,上海菁海仪器有限公司;

数显游标卡尺:SHAHE型,宁波北仑区科诚仪器有限公司;

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S型,上海凌科实业发展有限公司;

脱泡搅拌机:ARE-250型,日本新基株式会社;

真空干燥箱:DZF-6050型,上海一恒科学仪器有限公司;

热压机:CS-105H-20T型,惠州市城盛五金机械设备有限公司;

冷压机:CS-105F-20T型,惠州市城盛机械设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:FB9532PC型,上海一恒科学仪器有限公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet 380型,美国热电公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):JEOL JEM-4701型,日本电子公司;

电子万能试验机:CMT5350型,深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 样品制备

(1) 空心玻璃微珠的表面处理。

由于空心玻璃微珠的主要成分是硼硅酸盐,属于无机材料,而一般情况下无机材料与有机材料的相容性不好,可能会存在界面效应,所得产品比较脆,容易开裂,因此在进行填充前需要对空心玻璃微珠进行表面活化处理,以增加其反应性和粘结性。硅烷偶联剂一般用来改善玻璃纤维和树脂基体的相容性,而玻璃纤维成分主要是SiO₂,因此选用硅烷偶联剂KH-550对空心玻璃微珠S38HS进行表面处理,具体步骤如下:

向三口烧瓶中加入一定量的空心玻璃微珠,将配制好的硅烷偶联剂的乙醇溶液加入其中,在80℃下回流搅拌4 h,其中硅烷偶联剂的含量为空心玻璃微珠的1%,溶液浓度为2%。反应结束后将其移入烧杯中静置,将烧杯中的上层白色块状物移入培养皿中,在电热鼓风干燥箱中干燥,最后将烘干好的块状物用研钵研碎,得到表面处理后的空心玻璃微珠。

(2) 环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的制备。

通过旋转脱泡-浇注-模压成型法制备环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料。称取一定量的环氧树脂和改性胺类固化剂于烧杯中初步搅拌均匀,然后将其放入脱泡搅拌机中搅拌脱泡,设置搅拌时间为1 min,转速为2000 r/min,脱泡时间为30 s;搅拌脱泡完成后称取一定量的空心玻璃微珠加入其中,继续将其放入脱泡搅拌机中搅拌脱泡,设置搅拌

时间为 2.5 min,转速为 2000 r/min,脱泡时间为 15 s;搅拌脱泡完成后,通过浇注将其注入模具中;然后将模具放到热压机上加热加压固化 60 min,温度设置为 80℃,压力为 5 MPa,固化时间完成后将模具放到冷压机上加压冷却 5 min,压力同样设为 5 MPa,最后进行脱模得到环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料样品。

按照此方法制得空心玻璃微珠体积分数分别为 40%,50%,60%,70%,80% 的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料。需要注意的是,当所加入的空心玻璃微珠体积分数为 70% 和 80% 时,由于树脂所占比例少,体系黏度大,不容易进行搅拌脱泡,故需要加入适量的稀释剂丙酮以降低体系黏度,但需要将脱泡搅拌机的搅拌时间设置为 8 min,脱泡时间设为 1 min,以使所加丙酮得以挥发完全。最后再将制得的所有样品在真空干燥箱中进行后处理,以便使其进一步固化完全,温度设置为 100℃,时间为 120 min。环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料配方列于表 1。

表 1 环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料配方

空心玻璃微珠 体积分数/%	环氧树脂 含量/g	空心玻璃微 珠含量/g	改性胺类固化 剂含量/g	丙酮 含量/g
0	50.40	0	16.80	0
40	30.24	9.12	10.08	0
50	25.20	11.40	8.40	0
60	20.16	13.68	6.72	0
70	15.12	15.96	5.04	5.00
80	10.08	18.24	3.36	5.00

1.4 性能测试与表征

(1) 密度测定。

首先用电子天平称取样品质量(m),再用数显游标卡尺测得样品的长度、宽度和高度,计算样品体积(V),再由密度(ρ)公式 $\rho=m/V$ 计算出密度,每种样品测试 3 次,取其平均值作为最终实际密度。

(2) 压缩强度测试。

按照 GB/T 8813-2008 测试空心玻璃微珠体积分数为 60% 的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩强度。

(3) FTIR 测试。

对硅烷偶联剂处理前后的空心玻璃微珠粉体进行溴化钾压片,按照 GB/T 13584-2011,用 FTIR 仪进行测试。

(4) 样品断面形貌观察。

从测试样品断面取出一小部分,然后进行喷金处理,利用 FESEM 观察环氧树脂/空心玻璃微珠

复合浮力材料的断面形貌,加速电压为 20 kV。

2 结果与讨论

2.1 空心玻璃微珠表面处理前后比较

空心玻璃微珠表面处理前后的 FTIR 谱图如图 1 所示。

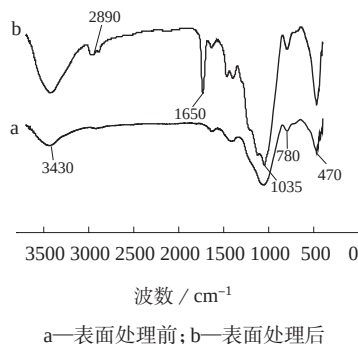


图 1 空心玻璃微珠表面处理前后的 FTIR 谱图

由图 1 可知,对于空心玻璃微珠表面处理前的 a 曲线,在 3430 cm^{-1} 处为空心玻璃微珠表面硅羟基的伸缩振动峰,470 cm^{-1} 处是 Si—O—Si 的弯曲振动峰,1035 cm^{-1} 处是 Si—O 键反对称伸缩振动峰,780 cm^{-1} 处是 Si—O 键对称伸缩振动峰;空心玻璃微珠表面处理后的 b 曲线在 3430 cm^{-1} 处相对于表面处理前的 a 曲线的振动加强,这是由于—NH₂ 的伸缩振动和空心玻璃微珠表面硅羟基的伸缩振动在此处重合,另外在 1650 cm^{-1} 处出现了 N—H 的弯曲振动峰,2890 cm^{-1} 处则是—CH₂ 的伸缩振动峰,说明通过硅烷偶联剂表面处理,成功将—NH₂ 引入空心玻璃微珠表面。

2.2 空心玻璃微珠表面处理对复合浮力材料密度和压缩强度的影响

空心玻璃微珠表面处理前后,不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料密度如图 2 所示,表面处理前后空心玻璃微珠体积分数为 60% 时,环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩应力—压缩应变曲线如图 3 所示。

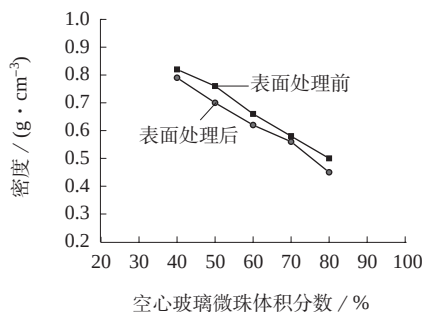


图 2 表面处理前后不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的密度

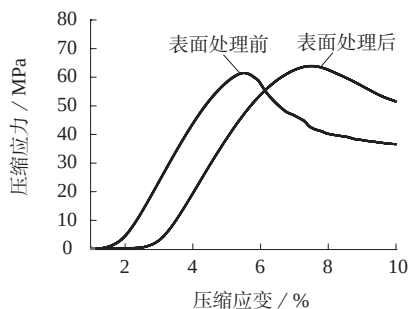


图3 表面处理前后空心玻璃微珠体积分数为60%时环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩应力-压缩应变曲线

从图2可以看出,空心玻璃微珠经硅烷偶联剂处理后,不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的密度变化不大。从图3可以看出,空心玻璃微珠经硅烷偶联剂表面处理后,环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩强度有了一定幅度的提高,从未处理时的61.41 MPa增加到63.87 MPa,压缩强度增加了4%。空心玻璃微珠经硅烷偶联剂处理后,空心玻璃微珠的表面引入了活性基团氨基,当将处理过的空心玻璃微珠加入到环氧树脂中时,其表面引入的氨基可以和环氧树脂中的环氧基团发生化学反应,增强了两相之间的相互作用,也就是说通过硅烷偶联剂的“桥梁”作用,空心玻璃微珠和基体树脂通过化学键连接到了一起,增加了两相的相容性,在材料受到压力作用时,空心玻璃微珠和树脂基体发生剥离时所需的压力增大,因此采用经硅烷偶联剂处理后的空心玻璃微珠所制得的复合浮力材料的压缩强度增大。

2.3 空心玻璃微珠体积分数对复合浮力材料密度和压缩强度的影响

不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的理论密度和实际密度如图4所示。

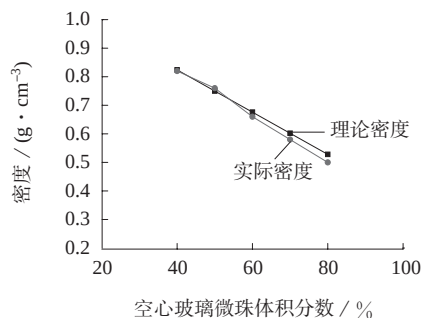


图4 不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的理论密度和实际密度

复合浮力材料的理论密度按式(1)和(2)计算:

$$\rho V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 \quad (1)$$

$$\rho = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 \quad (2)$$

式中: ρ , V ——分别为复合浮力材料的理论密度和理论体积;

ρ_1 , ρ_2 ——分别为空心玻璃微珠和环氧树脂的理论密度;

V_1 , V_2 ——分别为空心玻璃微珠和环氧树脂的理论体积;

φ_1 , φ_2 ——分别为空心玻璃微珠和环氧树脂的理论体积分数。

由图4可以看出,随着空心玻璃微珠体积分数的增加,复合浮力材料的理论密度和实际密度基本都呈线性减小趋势。当空心玻璃微珠体积分数小于60%时,环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的实际密度和理论密度相符。当空心玻璃微珠体积分数为60%时,复合浮力材料的理论密度和实际密度分别为0.676 g/cm³和0.66 g/cm³。但当空心玻璃微珠体积分数超过60%时,实际密度小于理论密度。这是因为在成型过程中,由于空心玻璃微珠的含量高,混合过程中很容易混入气泡或者空隙,从而造成实际密度小于理论密度的现象。

不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩强度如图5所示。

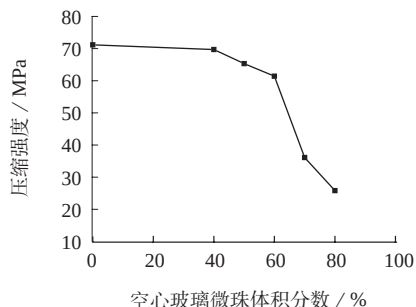


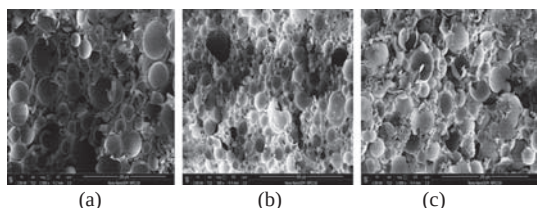
图5 不同空心玻璃微珠体积分数的环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩强度

空心玻璃微珠的压缩强度为37.9 MPa,环氧树脂的压缩强度为71.16 MPa,空心玻璃微珠的压缩强度低于环氧树脂。由图5可以看出,随着空心玻璃微珠体积分数的增加,环氧树脂/空心玻璃微珠复合浮力材料的压缩强度降低。当空心玻璃微珠体积分数分别为40%,50%,60%时,复合浮力材料的压缩强度分别为69.71,65.33,61.41 MPa,相对于纯环氧树脂基体,分别只降低了2.0%,8.2%,13.7%。当空心玻璃微珠体积分数在40%~60%范围时,复

合浮力材料的压缩强度缓慢降低;但当空心玻璃微珠体积分数大于 60% 时,复合浮力材料的压缩强度快速减小。这是因为此时已经达到空心玻璃微珠的逾渗点,部分空心玻璃微珠之间相互接触形成桥链;随着空心玻璃微珠体积分数继续增加,材料内部几乎是空心玻璃微珠挨着空心玻璃微珠,而空心玻璃微珠之间的空隙间充满着环氧树脂,因此在空心玻璃微珠体积分数超过 60% 时,材料压缩强度出现了急速下降的现象。

2.4 环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料的破坏机理

环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料断面的 FESEM 照片如图 6 所示。



空心玻璃微珠体积分数: a—40%; b—60%; c—80%

图 6 环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料断面的 FESEM 照片

从图 6 可以看出,当空心玻璃微珠体积分数为 40% 和 60% 时,复合浮力材料断面处的空心玻璃微珠并没破碎,这时材料的破坏主要是因为基体树脂和空心玻璃微珠之间发生了剥离而引起的。由图 5 可知,在空心玻璃微珠体积分数达到 60% 之前,复合浮力材料的压缩强度并没有发生明显的下降现象,也验证了复合浮力材料压缩强度的破坏主要还是界面剥离造成的破坏。当空心玻璃微珠体积分数为 80% 时,材料断面处大部分空心玻璃微珠被破坏,这时材料的破坏是空心玻璃微珠的破坏而引起的。因此为了保证材料的压缩强度,尽量不要过量添加空心玻璃微珠,避免产生压缩强度骤降的现象。

3 结论

通过旋转脱泡-浇注-模压成型法成功制备了环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料,研究了空心玻璃微珠体积分数对环氧树脂 / 空心玻璃微珠复合浮力材料性能的影响,以及空心玻璃微珠表面处理对复合浮力材料性能的影响,得出结论如下:

(1) 硅烷偶联剂处理过的空心玻璃微珠表面成功引入了氨基基团,制得复合浮力材料的压缩强度有所增大。

(2) 随着空心玻璃微珠体积分数的增加,复合浮力材料的密度逐渐降低,压缩强度也有所下降。当

空心玻璃微珠体积分数为 60% 时,复合浮力材料的压缩强度和密度分别达到 61.41 MPa 和 0.66 g/cm³,此时材料的性能较佳。

参考文献:

- [1] Ashrith H S, Doddamani M, Gaitonde V. Effect of wall thickness and cutting parameters on drilling of glass microballoon / epoxy syntactic foam composites[J]. Composite Structures, 2019, 211:318-336.
- [2] Shahapurkar K, Doddamani M, Kumar G C M, et al. Effect of cenosphere filler surface treatment on the erosion behavior of epoxy matrix syntactic foams[J]. Polymer Composites, 2019, 40:2 109-2 118.
- [3] Ding Junjie, Ye Feng, Liu Qiang, et al. Co-continuous hollow glass microspheres / epoxy resin syntactic foam prepared by vacuum resin transfer molding[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38:896-909.
- [4] Huang Chi, Huang Zhixiong, Wang Qiong. Effect of high-temperature treatment on the mechanical and thermal properties of phenolic syntactic foams[J]. Polymer Engineering and Science, 2018, 58:2 200-2 209.
- [5] Huang Chi, Huang Zhixiong, Lyu Xuesong, et al. Surface modification of hollow glass microsphere with different coupling agents for potential applications in phenolic syntactic foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134:doi:10.1002/app.44415.
- [6] Zhang Bingbing, Fan Zhiqiang, Hu Shuangqi, et al. Mechanical response of the fly ash cenospheres / polyurethane syntactic foams fabricated through infiltration process[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206:552-559.
- [7] Fan Zhiqiang, Miao Yuzhong, Wang Zhuangzhuang, et al. Effect of the cenospheres size and internally lateral constraints on dynamic compressive behavior of fly ash cenospheres polyurethane syntactic foams[J]. Composites, 2019, 171:329-338.
- [8] Ozkutlu M, Dilek C, Bayram G. Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams[J]. Composite Structures, 2018, 202:545-550.
- [9] Mohammadimehr M, Shahedi S. High-order buckling and free vibration analysis of two types sandwich beam including Al or PVC-foam flexible core and CNTs reinforced nanocomposite face sheets using GDQM[J]. Composites Part B:Engineering, 2017, 108:91-107.
- [10] Ding Anxin, Wang Jihui, Ni Aiqing, et al. Hygroscopic ageing of nonstandard size sandwich composites with vinylester-based composite faces and PVC foam core[J]. Composite Structures, 2018, 206:194-201.
- [11] Singh A K, Deptula A J, Anawal R, et al. Additive manufacturing of three-phase syntactic foams containing glass microballoons and

(下转第 55 页)

- berry polyphenols[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 126:doi:10.1016 / j.lwt.2020.109144.
- [3] Cesari A, Loureiro M V, Vale M, et al. Polycaprolactone microcapsules containing citric acid and naringin for plant growth and sustainable agriculture: physico-chemical properties and release behavior[J]. Science of The Total Environment, 2020, 703:doi:10.1016 / j.scitotenv.2019.135548.
- [4] Litina C, Al-Tabbaa A. First generation microcapsule-based self-healing cementitious construction repair materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255:doi:10.1016 / j.conbuildmat.2020.119389.
- [5] Ebrahimnezhad-Khaljiri H, Eslami-Farsani R. The tensile properties and interlaminar shear strength of microcapsules-glass fibers / epoxy self-healable composites[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 230:doi:10.1016 / j.engfracmech.2020.106937.
- [6] Ma Yanxuan, Zhang Yingrui, Liu Jiatong, et al. GO-modified double-walled polyurea microcapsules / epoxy composites for marine anticorrosive self-healing coating[J]. Materials & Design, 2020, 189:doi:10.1016 / j.matdes.2020.108547.
- [7] Meng Xiao, Qin Siyin, Fan Hongbo, et al. Long alkyl chain-grafted carbon nanotube-decorated binary-core phase-change microcapsules for heat energy storage: Synthesis and thermal properties[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 212:doi:10.1016 / j.solmat.2020.110589.
- [8] Attaei M, Vale M, Shakoor A, et al. Hybrid shell microcapsules containing isophorone diisocyanate with high thermal and chemical stability for autonomous self-healing of epoxy coatings[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 137(22):doi:10.1002 / app.48751.
- [9] Pittala R K, Ben B S. Synthesis and characterization of amine hardener filled microcapsules for self-healing composite applications[J]. Materials Research Express, 2019, 6(11):doi:10.1088 / 2053-1591 / ab4734.
- [10] Souzandeh H, Netravali A N. Self-healing of ‘green’ thermoset zein resins with irregular shaped waxy maize starch-based / poly(D, L-lactic-co-glycolic acid) microcapsules[J]. Composites Science and Technology, 2019, 183:doi:10.1016 / j.compscitech.2019.107831.
- [11] 梁治齐. 微胶囊技术与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- Liang Zhiqi. Microcapsule technology and application[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999.
- [12] Yuan Li, Gu Aijuan, Nutt S, et al. Novel polyphenylene oxide microcapsules filled with epoxy resins[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2013, 24(1):81–89.
- [13] Wu Shenmei, Yuan Li, Zhang Ying, et al. Chemically stable polyphenylene ether microcapsules prepared using a facile method for the self-healing of polymers[J]. Polymer International. 2016, 65:641–652.
- [14] Lee M H, Kang Y H, Kim J, et al. Freely shapable and 3D porous carbon nanotube foam using rapid solvent evaporation method for flexible thermoelectric power generators[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(29):doi:10.1002 / aenm.201970112.
- [15] Phan H T, Heiderscheit T S, Haes A J. Understanding time-dependent surface-enhanced raman scattering from gold nanosphere aggregates using collision theory[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(26):14 287–14 296.
- [16] 王德中. 环氧树脂生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- Wang Dezhong. Production and application of epoxy resin[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [17] Ahmed T, Edvinsson T. Optical quantum confinement in ultrasmall ZnO and the effect of size on their photocatalytic activity[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(11):6 395–6 404.
- [18] Kadić A, Palmqvist B, Lidén G. Effects of agitation on particle-size distribution and enzymatic hydrolysis of pretreated spruce and giant reed[J]. Biotechnol Biofuels, 2014, 7:doi:10.1186 / 1754-6834-7-77.
- [19] Podshivalov A V, Bronnikov S, Zuev V V, et al. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil: Statistical analysis of encapsulation[J]. Journal of Microencapsulation, 2013, 30(2):198–203.
-
- (上接第 48 页)
- air pores[J]. JOM, 2019, 71:1 520–1 527.
- [12] Kang D H, Hwang S W, Jung B N, et al. Effect of hollow glass microsphere (HGM) on the dispersion state of single-walled carbon nanotube (SWNT)[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 117:35–42.
- [13] Garcia C D, Shahapurkar K, Doddamani M, et al. Effect of arctic environment on flexural behavior of fly ash cenosphere reinforced epoxy syntactic foams[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 151:265–273.
- [14] Zeltmann S E, Chen B, Gupta N. Thermal expansion and dynamic mechanical analysis of epoxy matrix-borosilicate glass hollow particle syntactic foams[J]. Journal of Cellular Plastics, 2018, 54:463–481.
- [15] Ding Junjie, Liu Qiang, Ye Feng, et al. Compressive properties of co-continuous hollow glass microsphere / epoxy resin syntactic foams prepared using resin transfer molding[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 39:132–134.