

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.029

# 环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料研究现状

苏航,段正才,冉安国,王翀,徐猛

(航空工业陕西飞机工业有限责任公司,陕西汉中 723215)

**摘要:**从环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料应用的优势出发,首先介绍了环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料作为轻质高强材料的研究现状,这也是环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料应用的主要方面;其次介绍了环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料在热性能、电性能等其它方面的研究现状。在此基础上总结了环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料的研究及应用情况。

**关键词:**环氧树脂;中空玻璃微珠;复合材料;性能;应用

**中图分类号:** TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0165-05

## Research Status of Epoxy Resin/Hollow Glass Microsphere Composites

Su Hang, Duan Zhengcai, Ran Anguo, Wang Chong, Xu Meng

(AVIC Shaanxi Aircraft Industry Company Ltd., Hanzhong 723215, China)

**Abstract :** Based on the application advantages of epoxy resin/hollow glass microsphere composites, the research status of epoxy resin/hollow glass microsphere composites as light and high strength materials was introduced, which was also the main application aspect of epoxy resin/hollow glass microsphere composites. Then, the research status of epoxy resin/hollow glass microsphere composites in thermal properties, electrical properties and other aspects were introduced. On this basis, the research and application of epoxy resin/hollow glass microsphere composites were summarized.

**Keywords :** epoxy resin ; hollow glass microsphere ; composite ; property ; application

环氧树脂因具有优良的力学性能、绝缘性能及粘接性能、化学稳定性能、易加工成型和成本低廉等特点,在复合材料领域得到广泛应用。中空玻璃微珠是一种松散干燥的无机非金属材料,具有轻质高强,热导率低,热膨胀系数小,分散性、流动性、稳定性好的优点,另外还具有吸水率小、熔点高、耐腐蚀、绝缘、自润滑、隔音、无毒等优异性能。中空玻璃微珠由于其诸多优点,因而常用于填充环氧树脂制备复合材料,能够有效降低复合材料的密度,提高复合材料的比强度,提升抗压、抗冲击、隔音隔热、绝缘等性能。环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料广泛应用于深潜、航空航天、汽车等领域,在深潜领域,主要作为浮力材料用于深潜装备中,用于无人水下机器人、载人水下机器人、浮标、潜标、深海探测设备等,用量巨大;在航空航天领域,可用于制造飞机螺旋桨罩、夹芯结构的芯层、运载火箭的壳体等;在汽车领域,可用于汽车的车身和一些受力构件和内部构件等汽车零部件的制造。以上领域均是对材料的高强度及低密度有较高要求的领域,此时

环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料发挥了其作为轻质高强材料的优势,在上述领域得到了广泛的应用。作为轻质高强材料是环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料应用的主要方面。除此之外,环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料还因为其优异的热性能、电性能等在其它领域得到广泛应用。笔者从这两个大方面对国内外环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料的研究现状进行介绍。

### 1 轻质高强材料

环氧树脂复合材料具有耐温性好、强度高特点,并且具有优良的绝热性能,可以作为承载用结构材料。中空玻璃微珠密度低、表面光滑、流动性良好、耐腐蚀,因此环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料兼具两者优势,是性能优异的轻质高强材料,其中中空玻璃微珠对复合材料的密度起着决定性的作用。由于环氧树脂和中空玻璃微珠均具有较好的尺寸稳定性和较低的吸水率,环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料常被用来作为固体浮力材料。虽然加入中空玻璃微珠会降

**通信作者:** 苏航,硕士,高级工程师,主要研究方向为复合材料构件制造技术

**收稿日期:** 2021-11-04

**引用格式:** 苏航,段正才,冉安国,等. 环氧树脂 / 中空玻璃微珠复合材料研究现状 [J]. 工程塑料应用,2022,50(1):165-169.

Su Hang, Duan Zhengcai, Ran Anguo, et al. Research status of epoxy resin/hollow glass microsphere composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):165-169.

低复合材料的密度,但是这会对复合材料的强度产生不利影响,因此需要控制中空玻璃微珠的用量,以平衡复合材料的密度和强度<sup>[1]</sup>。为了获得更为理想的密度和强度,可以在复合材料中再引入一增强相,构成三相复合材料。在环氧树脂和中空玻璃微珠之外,再引入另一增强相,可以起到进一步降低密度或者在保持低密度的同时改善两相复合材料力学性能(如压缩性能)的作用。

### 1.1 两相复合材料

王瑛等<sup>[2]</sup>采用硅烷偶联剂改性中空玻璃微珠,并通过旋转脱泡-浇注-模压成型法制备了环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料。研究发现,表面处理有利于改善环氧树脂和中空玻璃微珠之间的界面,从而提高复合材料的压缩强度。添加高体积分数的中空玻璃微珠有利于降低复合材料的密度,而复合材料的压缩强度也随之降低。刘艳等<sup>[3]</sup>、李想等<sup>[4]</sup>、任素娥等<sup>[5]</sup>、彭丽芬等<sup>[6]</sup>、Wouterson等<sup>[7]</sup>、Delucchi等<sup>[8]</sup>的研究也得到相似的结论。

有研究表明<sup>[9]</sup>,添加硅烷偶联剂还可以显著降低环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料的吸水率,是由于硅烷偶联剂中的水解基团会与中空玻璃微珠表面的羟基发生反应形成氢键,减少了中空玻璃微珠表面的羟基与水分子形成氢键的机会;另外硅烷偶联剂有机端的氨基、环氧基等基团还可以与基体环氧树脂中的环氧基或氨基发生反应,增加了环氧树脂与中空玻璃微珠之间的界面作用力,从而降低了吸水能力。

于丝竹等<sup>[10]</sup>采用非等温差式扫描量热(DSC)法研究了以四氢苯酐为固化剂的环氧树脂 AFG-90 体系的固化反应动力学及机理并制备环氧树脂/中空玻璃微珠固体浮力复合材料。研究发现,AFG-90 与四氢苯酐的最佳质量比为 1:1;复合材料的实际密度比理论密度稍低,主要是制备过程中存在的气泡造成的。复合材料的压缩强度比纯树脂有所降低,是由于中空玻璃微珠强度小、材料中存在气泡、中空玻璃微珠与基体树脂粘结性较差所致。

吴少慧等<sup>[11]</sup>借鉴陶瓷材料模压成型工艺提出了适用于环氧树脂基固体浮力复合材料制备的真空辅助模压成型自由固化方法,实现了固体浮力复合材料制备过程中成型与固化环节的分离,为环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料的制备提供了新方法。以环氧树脂 E-4221 为基体,中空玻璃微珠为填充材料,采用模压成型自由固化方法制备较高中空玻璃微珠体积分数的固体浮力复合材料。发现真空辅助模压成型自由固化方法适用于中空玻璃微珠体积分数为 65%~67% 的 E-4221/中空玻璃微珠固体浮力复合材料的制备,所获得的固体浮力复合材料密度为 0.621~0.655 g/cm<sup>3</sup>,适用深度可达 8 000~10 000 m。

刘志等<sup>[12]</sup>选用双酚 A 型环氧树脂和酸酐类固化剂,采

用真空法制备了可用于 6 000 m 深度的环氧树脂/中空玻璃微珠固体浮力复合材料,该材料密度为  $(0.58 \pm 0.02)$  g/cm<sup>3</sup>,平均压缩强度大于 69.93 MPa。在 66 MPa,24 h 全方位静水压下,吸水率小于 0.4%;在 66 MPa,65 h 全方位静水压下,吸水率小于 1.1%。表面喷涂阻水层后,能有效降低固体浮力复合材料的吸水性。

张响等<sup>[13]</sup>以环氧树脂 E-44、固化剂聚酰胺 650、中空玻璃微珠和偶联剂为主要原料,通过真空固化工艺,制备环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料。结果表明,中空玻璃微珠质量分数为 20% 时,复合材料的综合性能最优,其密度为 0.75 g/cm<sup>3</sup>,压缩强度为 45.96 MPa,而吸水率仅为 0.24%。

梁小杰等<sup>[14]</sup>以环氧树脂为基体,中空玻璃微珠为填充物制备得到轻质耐高压浮力复合材料。研究表明,不同静水压条件下,当静水压大于中空玻璃微珠的压缩强度时,中空玻璃微珠会在高压作用下产生破裂,吸水率升高;当静水压低于中空玻璃微珠的压缩强度时,材料的吸水率基本不变。

衣亚东等<sup>[15]</sup>借鉴陶瓷坯体挤出成型工艺,采用真空辅助挤出成型的方法制备了高中空玻璃微珠体积分数的环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料。用自制的液压挤出成型机在真空状态下,经加料、闷压、挤出和固化四个过程完成复合材料的成型。当中空玻璃微珠体积分数为 67% 和 68% 时,复合材料的密度分别为 0.648 g/cm<sup>3</sup> 和 0.635 g/cm<sup>3</sup>,压缩强度分别为 80.0 MPa 和 59.8 MPa,作为浮力材料可使用的深度分别为 12 000 m 和 8 000 m。

单丹等<sup>[16]</sup>研究了中空玻璃微珠、AC 发泡剂和可膨胀微球填料对复合材料密度、压缩强度等主要性能的影响。研究表明,以中空玻璃微珠 HGMS-S15 为填料的复合材料虽然具有较好的压缩强度和吸水率,但由于体积密度很难低于 0.40 g/cm<sup>3</sup>,更适合应用于工作深度大于 300 m 的深水环境。

熊利等<sup>[17]</sup>研究发现,将不同粒径的中空玻璃微珠混合,可以提升中空玻璃微珠的堆积系数,从而使不同粒径中空玻璃微珠混合体系的实际体积分数提高,更有效地降低复合材料的密度。王跃平等<sup>[18]</sup>的研究也得到相似的结论。

### 1.2 三相复合材料

姜涛等<sup>[19]</sup>通过滚球法制备了中空玻璃微珠增强环氧树脂中空球(HGMS-EHS),通过模压法制备环氧树脂/HGMS-EHS/中空玻璃微珠三相复合浮力材料。研究表明,HGMS-EHS 可以明显降低三相复合浮力材料的密度。当 HGMS-EHS 密度为 0.125 g/cm<sup>3</sup> 且质量分数为 60% 时,三相复合浮力材料的密度为 0.387 g/cm<sup>3</sup>,压缩强度为 9.3 MPa,适合于在 930 m 深海域中工作。

赵忠贤等<sup>[20]</sup>采用滚球法制备了二氧化硅凝胶超细粉

体(SAR)强化的厘米级轻质环氧树脂中空球(SAR-EHS),利用真空搅拌-模压成型法将SAR-EHS、中空玻璃微珠与环氧树脂复合制备了环氧树脂/SAR-EHS/中空玻璃微珠三相复合材料。发现SAR-EHS和中空玻璃微珠能够在环氧树脂中混合使用,有效地降低了复合材料密度。三相复合材料的密度可低至 $0.40\text{ g/cm}^3$ 以下,压缩强度为 $7\sim 15\text{ MPa}$ ,适用于深度为 $700\sim 1500\text{ m}$ 海域内的较大载荷作业。

王耀声等<sup>[21]</sup>使用浓混酸体系对碳纤维的表面进行处理得到氧化碳纤维(OCF)。采用超声分散和模具浇注成型法制备环氧树脂/中空玻璃微珠/OCF复合材料。随着OCF含量的增加,复合材料的密度变化不大,其压缩强度呈现先升高后降低的趋势。当OCF质量分数为5%时,压缩强度达 $41\text{ MPa}$ ,提高约13.8%。研究发现OCF能够有效代替环氧树脂基体承载很大一部分载荷,此时中空玻璃微珠所受应力降低,减少了中空玻璃微珠破碎及裂纹源的产生,起到了增强的作用。

余为等<sup>[22]</sup>制备了纤维长度为 $1\text{ mm}$ 和 $2\text{ mm}$ 的碳纤维增强环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料。发现添加两种长度的碳纤维都能明显提高复合材料的弯曲和压缩性能。当碳纤维用量为环氧树脂和固化剂总质量的0.5%时,弯曲强度和压缩强度达到最大值。与碳纤维长度为 $2\text{ mm}$ 时相比,碳纤维长度为 $1\text{ mm}$ 时纤维含量的变化对复合材料的弯曲强度、压缩强度和压缩弹性模量有更显著的影响。

鄢柳柳等<sup>[23]</sup>使用长度为 $100\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ 的T300碳纤维,通过模压工艺制备了环氧树脂/中空玻璃微珠/短切碳纤维复合材料。研究表明,随着碳纤维含量的增加,复合材料密度变化较小,压缩强度上升。当碳纤维质量分数为4%时,复合材料的压缩强度最大。

王彩华等<sup>[24]</sup>制备了环氧树脂/中空玻璃微珠/玻璃纤维复合材料。研究发现,当复合材料中玻璃纤维含量较小时,其弯曲强度随玻璃纤维含量增加而增大,玻璃纤维用量为环氧树脂质量的10%时,复合材料弯曲强度达到最大,比未添加玻璃纤维的试件增加27%,弯曲弹性模量增加18.2%。试件在 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液和 $\text{NaOH}$ 溶液中浸泡后,酸碱溶液不仅腐蚀破坏了基体间的部分界面,降低了界面结合力,也腐蚀了玻璃纤维、中空玻璃微珠和树脂基体,从而导致复合材料弯曲强度大幅降低。

支超等<sup>[25]</sup>将经编间隔织物、中空玻璃微珠与环氧树脂合成环氧三相复合材料,并研究其弯曲性能。研究表明,环氧三相复合材料相较于环氧浇注体,其弯曲强度提高了64.79%,其弯曲弹性模量是环氧浇注体的两倍以上。环氧三相复合材料的弯曲强度比经编间隔织物或中空玻璃微珠单独增强环氧树脂复合材料的高,说明经编间隔织物及中空玻

璃微珠两种增强体产生了良好的复合作用。

Yu等<sup>[26]</sup>制备了碳纤维增强的环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料。用五种不同质量分数的碳纤维制备了五种类型的复合材料。研究了纤维含量和浸泡腐蚀对复合材料弯曲性能的影响。弯曲试验结果表明,碳纤维的加入使复合材料的弯曲强度明显提高。当纤维质量分数为5%时,其弯曲强度最大值比未添加纤维时提高了25.5%。浸泡腐蚀降低了复合材料的弯曲性能,纤维质量分数为5%的复合材料在蒸馏水中和海水中的弯曲强度分别降低了34.4%和37.5%。

Keivani等<sup>[27]</sup>研究了含纳米二氧化硅和中空玻璃微珠的环氧三相复合材料的断裂韧性。实验结果表明,纳米二氧化硅和中空玻璃微珠具有协同增韧的效果。10份中空玻璃微珠或10份纳米二氧化硅的掺入分别使环氧树脂的断裂韧性提高了39%和91%。而使用10份的两者共混物填充可使环氧树脂的断裂韧性提高120%。结果表明,共混物具有不同的增韧机制,即纳米二氧化硅的塑性变形和中空玻璃微珠的裂纹扩展,这两种增韧机制均有助于环氧三相复合材料断裂韧性的提高。

## 2 其它领域

环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料除具有优异的比强度外,还具有优异的热性能、电性能,因而对环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料其它方面的研究,主要集中在热性能、电性能等方面,以及固化动力学研究、仿真分析等。

黄婷等<sup>[28]</sup>采用静电自组合法,使氧化石墨烯与中空玻璃微珠结合,再对氧化石墨烯进行还原。将处理后的中空玻璃微珠加入环氧树脂/导电炭黑-石墨烯纳米片中,制得一种高介电、低损耗的导电环氧复合材料,在 $1\text{ kHz}$ 下的介电常数达454.5,介电损耗为0.065。中空玻璃微珠作为还原氧化石墨烯的载体和三维导电网络的隔离球体,有助于降低导电填料的填充量和降低介电损耗。

Mohammed等<sup>[29]</sup>使用化学气相沉积(CVD)工艺,在不同温度下使中空玻璃微珠表面呈放射状生长碳纳米材料,然后将不同温度下处理后的中空玻璃微珠分别作为填料制成环氧复合材料。研究发现,相对于其它CVD合成温度的中空玻璃微珠制作的环氧复合材料,CVD合成温度为 $600^\circ\text{C}$ 的复合材料具有更优的力学性能、热力学性能和屏蔽性能。

李佩鲜等<sup>[30]</sup>以双酚F环氧树脂为基体,以中空玻璃微珠为填料,制备环氧树脂绝缘复合材料。实验结果表明,中空玻璃微珠质量分数为8%时,复合材料的热膨胀系数最小、介电常数最低。

李想等<sup>[31]</sup>采用非等温DSC法研究了添加中空玻璃微珠的环氧树脂固化动力学过程,通过外推法得到了制备环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料的固化工艺参数。研究发现

中空玻璃微珠的加入,使环氧树脂体系的固化反应起始温度提前 7~12℃,峰值温度偏低 4~6℃,这与中空玻璃微珠在材料内部形成导热通道,提高复合材料整体的导热性能密切相关。

Vahtrus 等<sup>[32]</sup>将中空玻璃微珠作为填料,用于提高环氧树脂的隔热性能。当中空玻璃微珠质量分数为 50% 时,复合材料的热导率由 0.182 W/(m·K) 降至 0.104 W/(m·K)。

陈沉等<sup>[33]</sup>将中空玻璃微珠加入环氧树脂中,用于改善环氧相与陶瓷相的热匹配,提高 1-3 型压电复合材料的温度稳定性。研究表明,复合材料的谐振频率和机电耦合系数在 15~50℃ 范围内变化率≤1%,表现出良好的温度稳定性。

余为等<sup>[34]</sup>建立了中空玻璃微珠随机分布的立方体周期胞元模型,以此分析中空玻璃微珠的体积分数、壁厚比等因素对复合材料力学性能的影响。通过力学性能分析,发现相对壁厚存在临界值(约为 0.06),当微珠相对壁厚小于临界值时,复合材料的屈服强度随微珠含量增加而减小;而当相对壁厚大于临界值时,复合材料的屈服强度随微珠含量增加而增加。

王照辉等<sup>[35]</sup>研制了基于形状记忆环氧树脂聚合物的温敏可膨胀型堵漏剂。由于形状记忆环氧树脂密度高,内部几乎不存在孔隙,导致其可压缩性差,无法直接应用于温敏膨胀型堵漏剂的制备(需要实现体积变化)。加入中空玻璃微珠制备出了可压缩的形状记忆环氧复合材料。实验结果表明,形状记忆环氧复合材料的膨胀率随着中空玻璃微珠添加量的增大而增加,当中空玻璃微珠用量为环氧树脂质量的 45% 时,可以达到膨胀率 109%,表明中空玻璃微珠的加入能够有效改善形状记忆环氧树脂的可压缩性。

都待尧<sup>[36]</sup>采用两种结构分别作为外骨骼机器人背部结构,其中一种结构为环氧树脂/中空玻璃微珠/T700 碳纤维夹层结构。其将 T700 碳纤维作为面层、环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料作为芯层,构成了新的夹层结构复合材料。通过仿真计算发现,以环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料作为芯层的夹层结构具有更好的刚度特性,在相同载荷作用下的变形更小。

Zhuo 等<sup>[37]</sup>采用不同质量比的膨胀型阻燃剂(IFR)和中空玻璃微珠制备了一系列阻燃环氧树脂复合材料。研究表明,中空玻璃微珠和 IFR 具有协同阻燃的作用。首先,中空玻璃微珠可以促进致密的炭化层的形成;其次,中空玻璃微珠可以防止炭化层发生开裂。

Trofimov 等<sup>[38]</sup>研究了中空玻璃微珠 MS-VP-A9 分散填充的环氧树脂 DER-330 和 ED-20 低聚物固化时,中空玻璃微珠 MS-VP-A9 和固化温度对复合材料残余应力的影响。结果表明,中空玻璃微珠的引入和固化温度的改变使固化过

程中残余应力水平降低了约一半。

### 3 结语

环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料凭借其优异的比强度、热性能、电性能在深潜、航空航天、绝热绝缘等领域中发挥着重要作用。随着国内外对海洋探索和开发力度的增大,环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料在海洋中的应用日益增长,尤其是在深海固体浮力材料领域。另一方面,航空航天领域对材料减重需求也使得环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料在航空航天中的应用越来越多。对环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料热性能、电性能方面的研究及应用也日益增多。相信随着研究的深入,环氧树脂/中空玻璃微珠复合材料的应用会越来越广泛。

### 参考文献

- [1] 梁小杰,等.工程塑料应用,2015,43(2):121-124.  
Liang Xiaojie, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43(2):121-124.
- [2] 王瑛,等.工程塑料应用,2020,48(9):44-48.  
Wang Ying, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9):44-48.
- [3] 刘艳,等.舰船科学技术,2017,39(3):87-90.  
Liu Yan, et al. Ship Science and Technology, 2017, 39(3):87-90.
- [4] 李想,等.工程塑料应用,2016,44(4):31-34.  
Li Xiang, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4):31-34.
- [5] 任素娥,等.稀有金属材料与工程,2015,44(S1):299-302.  
Ren Su'e, et al. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(S1):299-302.
- [6] 彭丽芬,等.化学工程与装备,2020(2):41-43.  
Peng Lifen, et al. Chemical Engineering & Equipment, 2020(2):41-43.
- [7] Wouterson E M, et al. Composites Science and Technology, 2005, 65(11):1 840-1 850.
- [8] Delucchi M, et al. Progress in Organic Coatings., 2011, 72(1):58-64.
- [9] 陈晨阳,等.理化检验-物理分册,2018,54(6):390-394.  
Chen Chenyang, et al. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A:Physical Testing), 2018, 54(6):390-394.
- [10] 于丝竹,等.北京理工大学学报,2018,38(11):1 205-1 210.  
Yu Sizhu, et al. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(11):1 205-1 210.
- [11] 吴少惠,等.复合材料学报,2020,37(10):2 401-2 408.  
Wu Shaohui, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10):2 401-2 408.
- [12] 刘志,等.合成材料老化与应用,2019,48(1):47-50.  
Liu Zhi, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(1):47-50.

- [13] 张响,等.现代塑料加工应用,2016,28(3):16-19.  
Zhang Xiang, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2016,28(3):16-19.
- [14] 梁小杰,等.化工新型材料,2015,43(10):191-192.  
Liang Xiaojie, et al. New Chemical Materials,2015,43(10):191-192.
- [15] 衣亚东,等.现代塑料加工应用,2021,33(4):5-9.  
Yi Yadong, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2021,33(4):5-9.
- [16] 单丹,等.冶金与材料,2020,40(6):133-134.  
Shan Dan, et al. Metallurgy and Materials,2020,40(6):133-134.
- [17] 熊利,等.矿冶工程,2018,38(5):33-35.  
Xiong Li, et al. Mining and Metallurgical Engineering,2018, 38(5):33-35.
- [18] 王跃平,等.材料开发与应用,2021(4):57-61.  
Wang Yueping, et al. Development and Application of Materials, 2021(4):57-61.
- [19] 姜涛,等.现代塑料加工应用,2019,31(5):9-12.  
Jiang Tao, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2019,31(5):9-12.
- [20] 赵忠贤,等.塑料科技,2019,47(3):53-58.  
Zhao Zhongxian, et al. Plastics Science and Technology,2019, 47(3):53-58.
- [21] 王耀声,等.功能材料,2018,49(8):8 205-8 210.  
Wang Yaosheng, et al. Journal of Functional Materials,2018, 49(8):8 205-8 210.
- [22] 余为,等.材料研究学报,2017,31(4):300-308.  
Yu Wei, et al. Chinese Journal of Materials Research,2017, 31(4):300-308.
- [23] 鄢柳柳,等.玻璃钢/复合材料,2016(7):38-41.  
Yan Liuliu, et al. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(7):38-41.
- [24] 王彩华,等.机械强度,2018,40(2):312-318.  
Wang Caihua, et al. Journal of Mechanical Strength,2018, 40(2):312-318.
- [25] 支超,等.东华大学学报:自然科学版,2016,42(3):338-343.  
Zhi Chao, et al. Journal of Donghua University:Natural Science, 2016,42(3):338-343.
- [26] Yu Wei, et al. Fibers and Polymers,2017,18(5):971-978.
- [27] Keivani M, et al. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2015,54(6):581-593.
- [28] 黄婷,等.复合材料学报,2020,37(1):27-34.  
Huang Ting, et al. Acta Materiae Compositae Sinica,2020, 37(1):27-34.
- [29] Mohammed I, et al. Polymer Composites,2021,42(8):3 786-3 798.
- [30] 李佩鲜,等.胶体与聚合物,2020,38(1):3-6.  
Li Peixian, et al. Chinese Journal of Colloid & Polymer,2020, 38(1):3-6.
- [31] 李想,等.理化检验-物理分册,2017,53(4):244-248.  
Li Xiang, et al. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A:Physical Testing),2017,53(4):244-248.
- [32] Vahtrus M, et al. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences,2017,66(4):339-346.
- [33] 陈沉,等.功能材料,2020,51(9):10 094-10 099.  
Chen Chen, et al. Journal of Functional Materials,2020, 51(9):10 094-10 099.
- [34] 余为,等.材料导报,2020,34(8):16 161-16 166.  
Yu Wei, et al. Materials Reports,2020,34(8):16 161-16 166.
- [35] 王照辉,等.钻井液与完井液,2020,37(4):412-420.  
Wang Zhaohui, et al. Drilling Fluid & Completion Fluid,2020, 37(4):412-420.
- [36] 都待尧.工程机械,2020,51(4):81-87.  
Du Daiyao. Construction Machinery and Equipment,2020, 51(4):81-87.
- [37] Zhuo Jinlong, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017,129(1):357-366.
- [38] Trofimov A N, et al. Polymer Science Series D,2017,10(2):95-98.

(上接第 164 页)

- Liu Yuting, et al. New Carbon Materials,2021,36(3):639-648.
- [35] Kore S, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research,2021, 60(10):3 981-3 991.
- [36] Jung H S, et al. Fibers and Polymers,2021,22(1):184-195.
- [37] Yuan Haojie, et al. Applied Surface Science,2013,279:279-284.
- [38] Yuan Haojie, et al. Applied Surface Science,2014,317:737-744.
- [39] Zhang Yuanyuan, et al. Composite Structures,2021,270. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114057.
- [40] Zhang Yuanyuan, et al. Composites Part B:Engineering,2021,212. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114057.
- [41] Hao Ruiting, et al. Applied Surface Science,2019,485:304-313.