文章编号:1674-2869(2025)05-0508-08

增强隔热型改性地质聚合物的制备与性能研究

杨 舟,徐梦婷,刘芯琪,申海蔚,吴艳光*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:传统波特兰水泥的生产过程会排放大量温室气体并消耗大量能源,为了开发新型绿色、节能胶凝材料,将硅烷偶联剂(KH550)改性的钛酸钾晶须(PTW)和空心玻璃微珠(HGM)掺入地质聚合物(GP)中制备了一种新型隔热GP,通过导热系数测定仪、万能材料试验机、X射线衍射仪、傅里叶变换红外光谱仪、扫描电子显微镜等仪器对其导热系数、机械性能以及微观结构进行了研究。结果表明:当改性PTW的质量分数为2%时,GP的抗压强度可达到57.1 MPa,最低导热系数可降至0.129 W/(m·K),与未改性样品相比,抗压强度提高了49.08%,导热系数降低了69.72%。当改性HGM的质量分数为25%时,GP最低导热系数可降至0.095 W/(m·K),降低了78.70%,抗压强度可达7.2 MPa。此外,当养护龄期达到28 d时,GP固化完全,力学性能和隔热性能不再发生显著变化。可见,掺入由KH550改性的PTW和HGM后,GP的隔热性能和力学性能明显提高,并且随养护龄期的增加而提升。最后,揭示了PTW的桥接作用以及HGM在GP内部形成的微孔结构和热反射作用。

关键词:地质聚合物;钛酸钾晶须;空心玻璃微珠;导热系数;力学性能
中图分类号:TU528 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202412003

Preparation and properties of modified geopolymer with enhanced thermal insulation

YANG Zhou, *XU Mengting*, *LIU Xinqi*, *SHEN Haiwei*, *WU Yanguang**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The traditional production process of Portland cement emits a large amount of greenhouse gases and consumes a great deal of energy. To develop new types of green and energy-efficient cementitious materials, in this study a novel thermal insulating geopolymer (GP) was prepared by incorporating potassium titanate whiskers (PTW) and hollow glass microspheres (HGM) modified with silane coupling agent (KH550) into GP. Its thermal conductivity, mechanical properties, and microstructure were studied using a thermal conductivity tester, a universal material testing machine, an X-ray diffractometer, a Fourier transform infrared spectrometer, a scanning electron microscope. The results showed that when the mass fraction of modified PTW was 2%, the compressive strength of GP reached 57.1 MPa, and its lowest thermal conductivity was reduced to 0.129 W/(m·K). Compared with the unmodified sample, its compressive strength increased by 49.08%, and its thermal conductivity by 69.72%. When the mass fraction of modified HGM was 25%, its lowest thermal conductivity was reduced to 0.095 W/(m·K), 78.70% lower than the unmodified sample, and its compressive strength reached 7.2 MPa. After 28 days of curing, the GP completely solidified, and its mechanical properties and thermal insulation performance stabilized. The bridging effect of PTW and

收稿日期:2024-12-03
基金项目:湖北省自然科学基金(2020CFB649)
作者简介:杨 舟,硕士研究生。Email:13477690284@163.com
***通信作者**:吴艳光,博士,副教授。Email:wygddxyz@163.com
引文格式:杨舟,徐梦婷,刘芯琪,等. 增强隔热型改性地质聚合物的制备与性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(5):508-515.

the microporous structure and heat-reflection effect formed by HGM inside GP were revealed.

Keywords: geopolymer; potassium titanate whisker; hollow glass microspheres; thermal conductivity; mechanical property

传统波特兰水泥（ordinary Portland cement，OPC）作为一种无机建筑材料，在建筑和道路行业广泛应用。然而，它却存在与其生产过程中的温室气体排放和能源低效有关的显著缺陷[1]。完整的OPC生产过程包括原材料的提取、运输、熟料的煅烧和成品的研磨，每生产1 t OPC需要约3.1 GJ的能量。此外，每生产1 t OPC大约排放800 kg的二氧化碳、1.1 kg的二氧化硫和2.1 kg的氮氧化物[2-3]。因此，开发新型绿色、节能的胶凝材料来替代OPC具有重要意义[4-5]。地质聚合物（geopolymer，GP）由Davidovits于20世纪70年代提出，是一种半晶态的三维硅铝酸盐材料[6-7]。GP由固体废弃物（如高岭土、粉煤灰、废玻璃等）与碱性激活剂反应合成，具有快速凝结、高抗压强度、优良的耐久性、低导热系数以及优异的化学和热稳定性等特点[8]。

目前对建筑保温材料的研究主要集中于由硅酸盐、水、膨胀珍珠岩、聚苯乙烯颗粒[9]、玻璃微球及其他轻质骨料组成的OPC[10-11]。如Liu等[12]成功制备了一种利用二氧化硅（SiO_2）气凝胶颗粒改性的保温材料，其抗压强度为2.15 MPa，导热系数为0.152 4 W/(m·K)。Gong和Beaino等[10,13]制备了一种水灰比为0.9、稻壳质量分数为15%、热导率为0.087 W/(m·K)、孔隙率为61.4%和抗压强度为0.1 MPa的绝缘材料。为了取代OPC，研究人员展开了对隔热GP的研究。郑立等[14]以粉煤灰为原料，添加SiC发泡剂以及Na_2CO_3和MgO等助熔剂制备出导热系数为0.16 W/(m·K)、抗压强度为0.67 MPa的轻质多孔GP。Novais等[15]制备了一种密度为560 kg/cm^3、抗压强度为1.23 MPa、导热系数为0.107 W/(m·K)的多孔GP。Feng等[16]以H_2O_2为发泡剂，获得了密度为335 kg/cm^3、导热系数为0.082 W/(m·K)、抗压强度为0.96 MPa的泡沫GP。以SiC、H_2O_2发泡剂、粉煤灰为原料制备的多孔GP的隔热性能良好，但力学性能不佳，使用场景受到限制。

为了制备一种兼具力学性能和隔热性能优异的GP，本研究通过将KH550改性的钛酸钾晶须（potassium titanate whiskers，PTW）和空心玻璃微珠（hollow glass microspheres，HGM）掺入GP中降低导热系数和增强抗压强度。PTW是以TiOs八面体通过共面和共棱连接而成连锁的隧道状结构，这种隧道结构赋予了PTW的一些特殊的用途[17]：如摩擦材料、高温隔热材料、绝缘材料、触媒载体等众多领域[18]。HGM的成分主要是硼硅酸盐，其颗粒呈现空心球体，粒径在10~100 μm之间，壁厚在1~2 μm之间。HGM内部为半真空，热导率为0.03 W/(m·K)，具有优良的隔音和热绝缘性能，使其成为各种绝缘和隔音产品的优秀填料[19]。KH550是一种氨基硅烷偶联剂，常用于增强不同种类材料之间的黏结强度，特别是聚合物与无机材料（如玻璃纤维、矿物等）之间的黏结[20-21]。本研究以经硅烷偶联剂（KH550）改性后的PTW和HGM为填料制备改性GP，并研究了其微观结构、热绝缘性能和力学性能。

1　实验部分

1.1　原　料

偏高岭土（metakaolin，MK）和粉煤灰（fly ash，FA）（河南铂润铸造材料有限公司）的粒径分别为3、10 μm，两者的主要成分如表1所示；碱激发剂（SiO_2和Na_2O的摩尔比为3.3），固含量为34%的硅酸钠（Na_2SiO_3）（上海国药化学试剂有限公司）；氢氧化钠（NaOH）、硅烷偶联剂（KH550）（国药化学试剂有限公司）；PTW（上海峰竺复合新材料科技有限公司）；HGM（灵寿县聚鸿矿产品加工厂）。

1.2　样品的制备

1.2.1　改性PTW和HGM的制备　首先，将Na_2SiO_3溶解于去离子水中，然后在机械搅拌下缓慢加入PTW，并升温至65 ℃。搅拌10 min后，逐滴加入乙酸乙酯。随后继续机械搅拌2 h，过滤、

表1　偏高岭土与粉煤灰的成分

Table 1　Composition of metakaolin and fly ash　　%

材料	$\omega(SiO_2)$	$\omega(Al_2O_3)$	$\omega(Fe_2O_3)$	$\omega(TiO_2)$	ω(CaO)	ω(MgO)	$\omega(K_2O)$	$\omega(Na_2O)$	$\omega(SO_3)$
MK	55.06	42.12	0.76	0.24	0.17	0.06	0.55	0.06	–
FA	46.50	35.10	6.39	2.06	5.73	0.65	0.68	–	2.19

清洗并干燥得到预处理的PTW样品。再将KH550溶解于乙醇溶液中，并超声处理30 min得到混合溶液。最后，将预处理的PTW（PTW和KH550的质量比为50∶1）加入KH550/乙醇混合溶液中，在室温下搅拌1 h，过滤、洗涤并干燥，得到KH550改性PTW样品。

HGM具体改性过程同PTW。

1.2.2 改性GP的制备 根据设计比例，将NaOH、Na_2SiO_3和去离子水搅拌均匀得到碱激发剂，静置24 h备用。称取预处理后的MK、FA及改性的PTW或HGM，加入碱激发剂后将浆体搅拌均匀，然后将其倒入30 mm×30 mm×30 mm的模型中，密封并在60 ℃下养护48 h。取出试样，继续在室温下养护至龄期，得到改性GP。具体制备过程如图1所示。



图1 改性GP的制备过程

Fig. 1 The preparation process of modified GP

1.3 测试表征

抗压强度测试通过万能材料试验机进行，加载速度为1 mm/min，每组测试5个样品取平均值。傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared spectrum，FTIR）（Bruker Alpha）在500~4 000 cm^{-1}范围内进行。采用扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM，JEOL JSM-5510LV）进行形态学观察。X射线衍射（X-ray diffraction，XRD）测试采用Bruker D8 X射线衍射仪（Cu $K\alpha$辐射，0.158 41 nm波长）进行，步长为0.02°，扫描范围为5°~90°。

1.4 导热系数测量

采用FD-TC-B导热系数测定仪测定不同改性GP样品的导热系数。20 ℃时，冷却板的比热容（c）为385 J/(kg·K)，质量（m）为891.42 g。冷却板的厚度（h_p）为7.66 mm，半径（R_p）为65.00 mm。样品上下表面加热板和冷却板的温度分别为θ_1和θ_2。将待测试样放在两块加热板中间，当显示器温度在5 min内保持恒定时，移开加热板并记录散热盘临近θ_2时的温度变化，如图2所示，根据式（1）计算导热系数（λ）：

$$\lambda = mc\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\bigg|_{\theta=\theta_2}\frac{R_P+2h_P}{2R_P+2h_P}\frac{4h_B}{\theta_1-\theta_2}\frac{1}{\pi d_B{}^2} \quad (1)$$

式（1）中：m为冷却板的质量，h_B为样品的厚度，d_B为样品的直径。

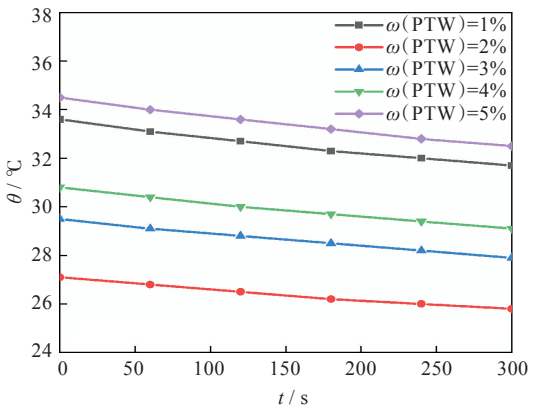


图2 散热盘临近θ_2时的温度变化

Fig. 2 Temperature variation of heat sink near θ_2

2 结果与讨论

2.1 XRD和FTIR分析

为了研究改性GP的化学成分和晶体相结构，进行了XRD和FTIR分析，结果如图3所示。

在图3（a）中，可以看到纯GP和不同改性GP的衍射峰几乎相同，在PTW改性的GP中，六钛酸钾（$K_2Ti_6O_{13}$）的特征衍射峰显著。结合PDF标准卡分析，它们的主要晶体相为铝硅石（$Al_6Si_2O_{13}$）和石英（SiO_2），并伴有少量的Fe_2O_3和$CaCO_3$相。此外，26.64°和57.74°处的特征峰分别对应于MK和FA的石英和赤铁矿的结晶相[22-23]。这些结晶相极为惰性，在GP聚合过程中几乎不会参与化学反应。在图3（b）中，3 450 cm^{-1}处的特征峰对应—OH的伸缩振动，而1 660 cm^{-1}处的特征峰对应GP孔隙中的结晶水，伴随着H—O—H的弯曲振动[24]。1 010 cm^{-1}的峰源于基体中Si—O键引起的非对称弯曲振动，代表C—A—S—H型铝硅酸盐链的典型结构[25-26]。低波数峰565和713 cm^{-1}表明GP基体中Si—O—T（T=Si或Al）键的变形[27]。此外，经过28 d养护后，红外光谱中出现的1 396 cm^{-1}附近的低强度峰提示GP中存在Na_2CO_3[28]。PTW和HGM的加入对GP的化学结构没有显著影响，峰位与纯GP相比基本保持不变，表明填料与基体主要以物理方式结合，这与XRD的表征结果一致。

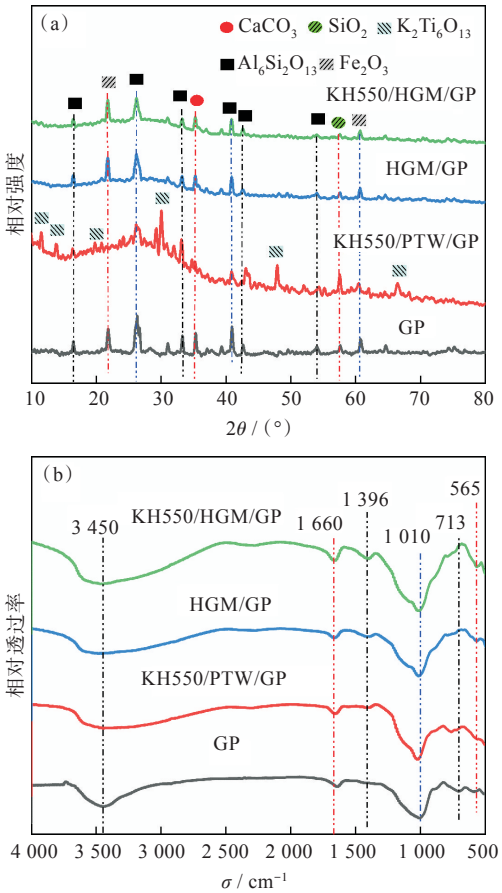


图 3　不同改性 GP：(a) XRD 图，(b) FTIR 谱图

Fig. 3　Different modified GP: (a) XRD patterns, (b) FTIR spectra

2.2　PTW 质量分数对 GP 力学和隔热性能的影响

PTW 及改性 PTW 质量分数对改性 GP 热绝缘性和机械性能的影响如图 4 所示。图 4 显示，随着改性 PTW 和 KH550 用量的增加，改性 GP 的抗压强度呈现先增加后降低的趋势，同时导热系数呈现先下降后上升的趋势。如图 4(c)所示，当 KH550 的质量分数为 2% 时，抗压强度最高可达 57.1 MPa，并且导热系数最低为 0.129 W/(m·K)。与纯 GP 相比，其抗压强度提高了 49.08%，导热系数降低了 69.72%，其原因是 PTW 中形成了链状通道结构，PTW 在室温下的导热系数仅为 0.054 W/(m·K)。此外，KH550 在 PTW 表面形成涂层，使 PTW 在 GP 基体内分散更均匀，从而降低 GP 的导热系数。GP 基体的结合不受剪切力的影响，通过晶须材料的拔出、断裂以及外力下的基体变形耗散能量[29]。这增强了晶须材料与基体之间的相互作用，减少了在大负载下 PTW 脱落或分层的可能性。同时，PTW 颤动产生的微晶须具有更大的表面积，增强了其抗压强度[30]。随着 KH550 用量的增加，涂层变得更厚，晶须材料与基体之间的结合强度更好，从而改善了机械性能。然而，当 PTW 和 KH550 的用量继续增加时，填料在 GP 基体中聚集，涂层的厚度和脆性增加，导致 GP 的抗压强度逐渐降低。

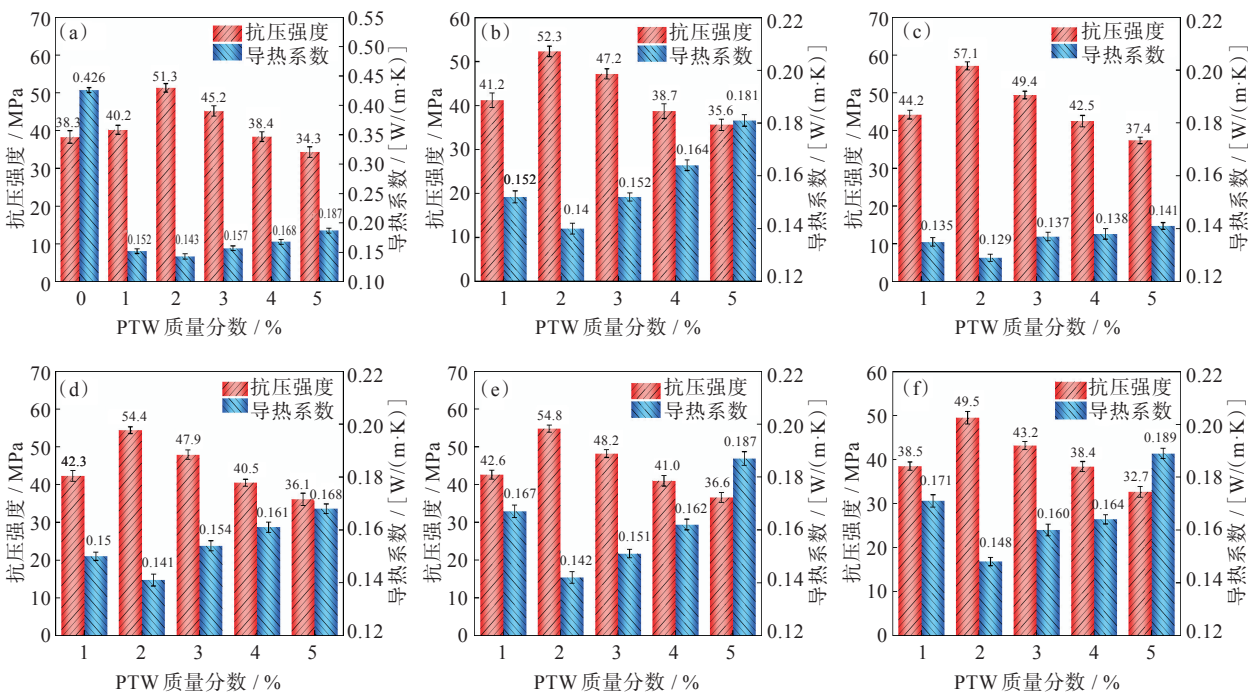


图 4　PTW 质量分数对 GP 力学和隔热性能的影响：(a) 纯 PTW，(b) ω(KH550)=1%，(c) ω(KH550)=2%，(d) ω(KH550)=3%，(e) ω(KH550)=4%，(f) ω(KH550)=5%

Fig. 4　Effect of PTW mass fraction on the mechanical and thermal insulation performance of GP: (a) pure PTW, (b) ω(KH550)=1%, (c) ω(KH550)=2%, (d) ω(KH550)=3%, (e) ω(KH550)=4%, (f) ω(KH550)=5%

2.3 HGM质量分数对改性GP力学和隔热性能的影响

图5为HGM及改性HGM质量分数对改性GP的机械性能和热绝缘性能的影响规律。随着HGM及改性HGM质量分数的增加，GP样品的抗压强度和导热系数均逐渐降低。相比于纯GP[0.426 W/(m·K)]，改性GP的导热系数最低降至0.095 W/(m·K)[图5(b)]，下降幅度达到78.70%。HGM由直径为10~100 μm、壁厚为1~2 μm的空心球形颗粒组成，其抗压强度仅为1.7 MPa，即随着HGM及改性HGM质量分数的增加，改性GP的抗压强度和导热系数均呈现逐渐下降的趋势。另外，图5显示，含KH550改性HGM的GP的抗压强度较纯HGM的GP提升了15%，而导热系数几乎没有变化。其原因是KH550增强了HGM与GP凝胶基体之间的界面结合强度，形成更紧密的结合，从而提升了改性GP的抗压强度。

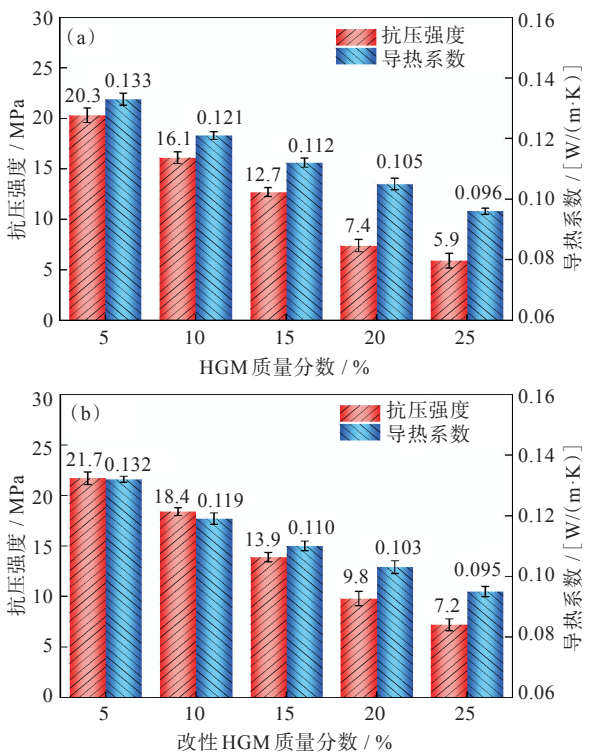


图5 HGM质量分数对改性GP力学和隔热性能的影响：(a)纯HGM，(b)改性HGM

Fig. 5 Effect of HGM mass fraction on the mechanical and thermal insulation properties of modified GP: (a) pure HGM, (b) modified HGM

2.4 养护龄期对改性GP力学和热绝缘性能的影响

从图6可以看到养护龄期对改性GP的力学和热绝缘性能的影响。随着养护时间的增加，不同改性GP的抗压强度逐渐提高，而导热系数则逐渐降低，至28 d趋于稳定。其原因是随着养护时间的增加，聚合反应持续进行，抗压强度逐渐增加，直到28 d时固化完全，此后性能不再发生显著变化。此外，GP在养护过程中逐渐脱水，水的导热系数很高，因此GP的导热系数逐渐降低，并在28 d左右趋于稳定。

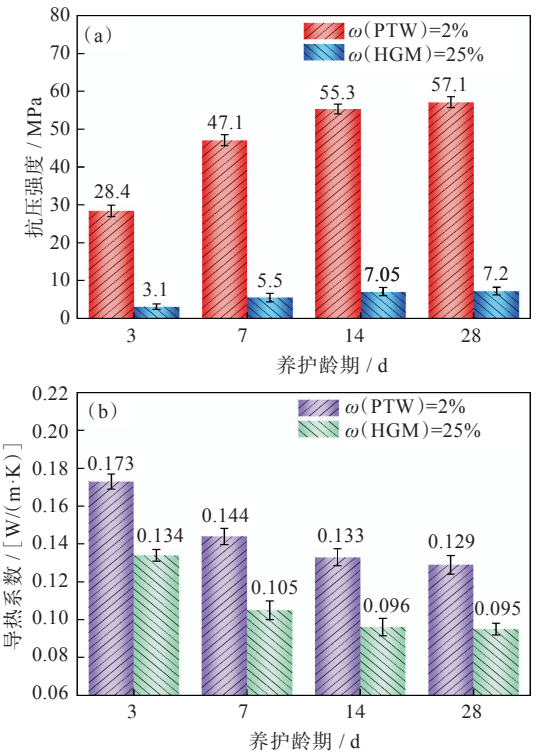


图6 养护龄期对改性GP抗压强度和导热系数的影响：(a)抗压强度，(b)导热系数

Fig. 6 Effect of curing age on the compressive strength and thermal conductivity of modified GP: (a) compressive strength, (b) thermal conductivity

2.5 SEM表征

采用SEM观察了不同改性GP的横截面微观形貌，如图7所示。从图7(a)中能看到纯PTW呈现出细长且表面光滑的形态。而在KH550改性PTW样品[图7(b)]中可以观察到大量小颗粒附着在PTW的表面，表明KH550成功地黏附在PTW表面，能够增强PTW与GP之间的界面黏结。此外，图7(c)显示，纯GP的断面有许多裂缝，这对GP的力学性能产生负面影响。图7(d)则显示，在加入改性PTW后，GP的断裂面上裂纹显著减少，这有助于改善GP的机械性能。由于PTW具有极低的导热系数和强的红外反射能力，PTW的引入有效地增强了GP的热绝缘性能。

在图7(e)中，纯HGM颗粒呈现球形且表面平滑，HGM微珠的空心结构赋予了其良好的隔音和热绝缘性能。在图7(f)中，改性HGM的表面存在有明显的黏性覆着物，表明KH550水解的硅醇基

成功吸附到HGM表面，从而可增强HGM与GP之间的界面黏结强度。从图7(g，h)中可以观察到，未改性HGM与GP之间的界面黏结效果不佳，而KH550改性的HGM与GP之间表现出较好的黏结效果，确保了紧密而牢固的黏附作用。

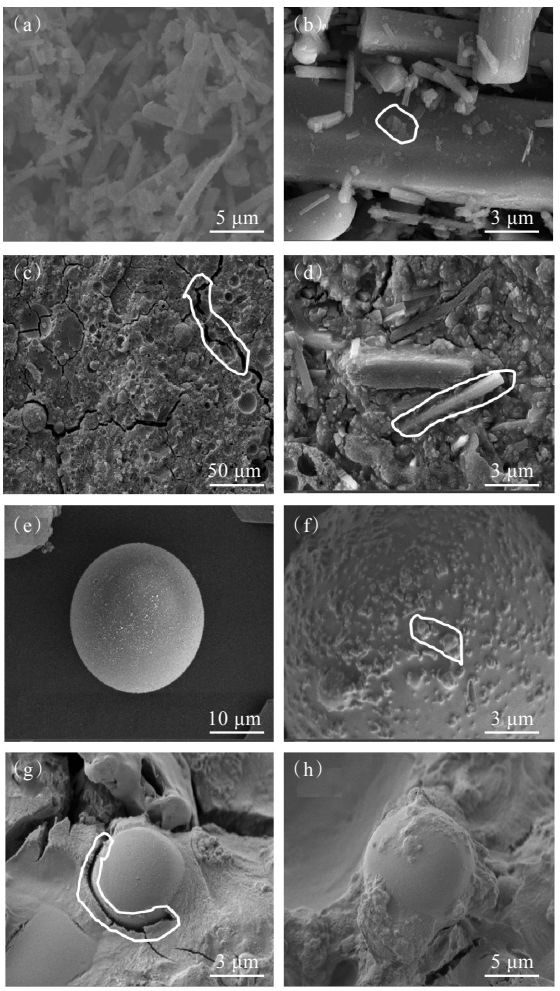


图7　不同改性GP样品的SEM微观结构：(a)纯PTW，(b) KH550/PTW，(c)纯GP，(d) KH550/PTW/GP，(e)纯HGM，(f) KH550/HGM，(g)纯HGM/GP，(h) KH550/HGM/GP

Fig. 7　SEM microstructure of different modified GP samples：(a) pure PTW，(b) KH550/PTW，(c) pure GP，(d) KH550/PTW/GP，(e) pure HGM，(f) KH550/HGM，(g) pure HGM/GP，(h) KH550/HGM/GP

2.6　改性GP热传导机理研究

基于上述研究，进一步揭示改性GP的热绝缘和力学增强机理(图8)。与纯GP相比，改性GP中所含填料PTW和HGM降低了热传导效率。这主要是因为PTW和HGM具有极低的导热系数，以及HGM的引入使得改性GP内部形成的微孔结构，而空气的导热系数仅为0.024 4 W/(m·K)，从而进一步降低了改性GP基体的热传导效率。此外，PTW和HGM均具有较高的红外反射率，能够反射一部分热量，这有利于增强改性GP的热绝缘效果。另外，如图8所示，当改性GP受到外部机械力作用时，均匀分散的PTW晶须与凝胶基体紧密结合，充当桥梁作用有效分散应力集中，从而阻碍了裂纹的进一步扩展，增强了改性GP基体的机械强度。这些机制协同作用，使得改性GP的热绝缘和机械性能得到了较大的提升。

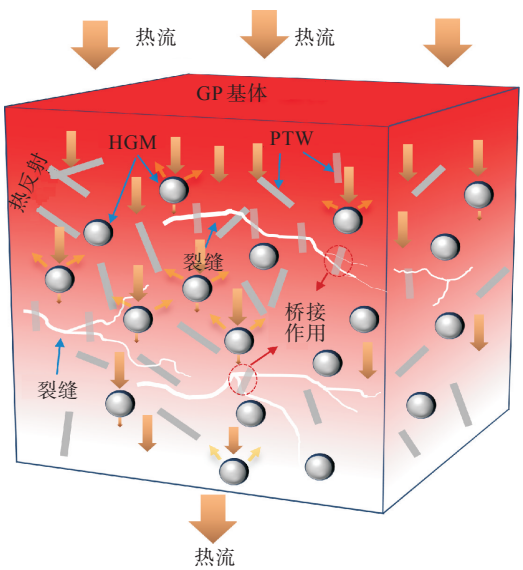


图8　改性GP的热绝缘和力学增强机理示意图

Fig. 8　Schematic diagram of insulation and reinforcement mechanism of modified GP

3　结　论

本研究成功制备了PTW改性GP和HGM改性GP，并对其性能进行了研究。主要结论如下：

(1)PTW的引入有助于降低GP的导热系数并增强其抗压强度。当PTW质量分数为2%时，改性GP的导热系数和抗压强度分别为0.129 W/(m·K)和57.1 MPa，较纯GP分别降低了69.72%和提高了49.08%。此外，随着养护龄期的增加，GP的导热系数逐渐降低，抗压强度逐渐提高。

(2)HGM的引入有助于进一步降低GP的热导率。当改性HGM的质量分数为25%时，GP的导热系数达到0.095 W/(m·K)，较纯GP降低了78.70%。此外，含有KH550改性HGM的GP较含纯HGM的GP抗压强度提高了15%。

(3)改性GP的隔热机理在于PTW和HGM的低热导效应及较高的红外热反射机制，有效地提高其隔热保温效果。此外，改性PTW晶须与GP基体之间的紧密结合和桥接作用，极大增强了GP体系的力学性能。

参考文献

[1] TIAN L Y, HE D P, ZHAO J N, et al. Durability of geopolymers and geopolymer concretes: a review [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 1-14.

[2] HABERT G, d'ESPINOSE De LACAILLERIE J B, ROUSSEL N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends [J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(11): 1229-1238.

[3] WU Y G, LU B W, BAI T, et al. Geopolymer, green alkali activated cementitious material: synthesis, applications and challenges [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 930-949.

[4] BHUTTA A, FAROOQ M, ZANOTTI C, et al. Pull-out behavior of different fibers in geopolymer mortars: effects of alkaline solution concentration and curing [J]. Materials and Structures, 2017, 50(1): 80.

[5] ABDEL-GAWWAD H A, ABO-EL-ENEIN S A. A novel method to produce dry geopolymer cement powder [J]. HBRC Journal, 2016, 12(1): 13-24.

[6] NYKIEL M, KORNIEJENKO K, SETLAK K, et al. The influence of diatomite addition on the properties of geopolymers based on fly ash and metakaolin [J]. Materials, 2024, 17(10): 2399.

[7] 高巧玲,范功端.硅灰对新型地质聚合物胶凝材料力学性能影响的研究进展[J].武汉工程大学学报,2020,42(5):540-545.

[8] GAO J, YANG Z, PI Z L, et al. Preparation and performance study of a novel conductive geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134388.

[9] DUAN P, SONG L X, YAN C J, et al. Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles [J]. Ceramics International, 2017, 43(6): 5115-5120.

[10] GONG J Q, DUAN Z R, SUN K Q, et al. Waterproof properties of thermal insulation mortar containing vitrified microsphere [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 274-280.

[11] HUANG Y J, GONG L L, PAN Y L, et al. Facile construction of the aerogel/geopolymer composite with ultra-low thermal conductivity and high mechanical performance [J]. RSC Advances, 2018, 8(5): 2350-2356.

[12] LIU Z H, DING Y D, WANG F, et al. Thermal insulation material based on SiO_2 aerogel [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 548-555.

[13] BEAINO S, EL HAGE P, SONNIER R, et al. Novel foaming-agent free insulating geopolymer based on industrial fly ash and rice husk [J]. Molecules, 2022, 27(2): 531.

[14] 郑力,葛浩,吴芮,等.气化飞灰基地聚物保温材料理化特性及机理研究[J/OL].煤炭转化,1-15(2024-10-08)[2025-03-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1163.TQ.20240930.1654.002.html.

[15] NOVAIS R M, BURUBERRI L H, ASCENSÃO G, et al. Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 119: 99-107.

[16] FENG J J, ZHANG R F, GONG L L, et al. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity [J]. Materials & Design, 2015, 65: 529-533.

[17] 柴宽,高佳,李小刚,等.钛酸钾晶须改性偏高岭土基多孔地质聚合物的制备与性能[J].武汉工程大学学报,2022,44(2):158-164.

[18] 刘琳,黄杰,林文庆.钛酸钾晶须表面改性及增强环氧树脂研究[J].工程塑料应用,2012,40(1):81-85.

[19] 王润庭,高梦岩,李海燕,等.空心玻璃微珠在涂料中的应用与研究进展[J].功能材料,2024,55(9):9071-9077.

[20] 李林香,谭盐宾,齐婧,等.玄武岩纤维表面改性及其对砂浆性能的影响[J].铁道建筑,2024,64(1):123-126.

[21] 柳力,刘朝晖,向宇,等.硅烷偶联剂改性玄武岩纤维的机理及其路用性能[J].建筑材料学报,2017,20(4):623-629.

[22] GÓMEZ-CASERO M A, De DIOS-ARANA C, BUENO-RODRÍGUEZ J S, et al. Physical, mechanical and thermal properties of metakaolin-fly ash geopolymers [J]. Sustainable Chemical and Pharmacy, 2022, 26: 100620.

[23] GÖRHAN G, ASLANER R, ŞINIK O. The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 97: 329-335.

[24] YE H Z, ZHANG Y, YU Z M, et al. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 10-16.

[25] LEE J K, SHANG J Q, WANG H L, et al. In-situ study of beneficial utilization of coal fly ash in reactive mine tailings [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 135: 73-80.

[26] LI Z M, LIANG X H, CHEN Y, et al. Effect of metakaolin on the autogenous shrinkage of alkali-

activated slag-fly ash paste [J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122397.

[27] HU Y, LIANG S, YANG J K, et al. Role of Fe species in geopolymer synthesized from alkali-thermal pretreated Fe-rich Bayer red mud [J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 398-407.

[28] ÁLVAREZ-AYUSO E, QUEROL X, PLANA F, et al. Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/2/3): 175-183.

[29] HE W D, WANG X, DING L N, et al. Experimental study on bond behavior of interface between fiber-reinforced polymer grids and concrete substrate [J]. Composite Structures, 2021, 257: 113164.

[30] SHAIKH F U A. Deflection hardening behaviour of short fiber reinforced fly ash based geopolymer composites [J]. Materials & Design, 2013, 50: 674-682.

本文编辑：苗　变

☆

（上接第507页）

[7] 季家友，张贺贺，马航，等. 湿法磷酸深度净化工艺的研究[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(5)：504-508.

[8] HUANG C J, YANG B M, CHEN K S, et al. Application of membrane technology on semiconductor wastewater reclamation: a pilot-scale study [J]. Desalination, 2011, 278(1/2/3): 203-210.

[9] 桑长波. 物化法-膜分离技术处理电镀废水的工程应用[J]. 科技与创新，2024(18)：185-187.

[10] KHALESS K, CHANOURI H, AMAL S, et al. Wet process phosphoric acid purification using functionalized organic nanofiltration membrane [J]. Separations, 2022, 9(4): 100.

[11] WANG Y X, YUAN C, ZHOU K, et al. Construction of Janus silicon carbide membranes with asymmetric wettability for enhanced antifouling in water-in-oil emulsification process [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 671: 121389.

[12] CEVALLOS-CUEVA N, RAHMAN Md M, KINFU H H, et al. Mass transport mechanisms insights of selective sodium/magnesium separation through nanofiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2025, 721: 123808.

[13] BAI J, LAI W, GONG L L, et al. Ionic liquid regulated interfacial polymerization process to improve acid-resistant nanofiltration membrane permeance [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 641: 119882.

[14] 刘国华，赵京，师东阳，等. 用新型螺旋射流气浮机处理含油废水试验研究[J]. 湿法冶金，2019，38(1)：60-63.

[15] BROŻEK M, MŁYNARCZYKOWSKA A. The distribution of air bubble size in the pneumo-mechanical flotation machine [J]. Archives of Mining Sciences, 2012, 57(3): 729-740.

[16] CATH T Y, CHILDRESS A E, ELIMELECH M. Forward osmosis: principles, applications, and recent developments [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 281(1/2): 70-87.

[17] ABEDI F, DUBÉ M A, KRUCZEK B. Adsorption of heavy metals on the surface of nanofiltration membranes: "a curse or blessing"? [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 685: 121988.

[18] 傅英，刘文彪，倪双林，等. 不同MER值磷矿制磷酸实验研究[J]. 磷肥与复肥，2021，36(11)：30-31.

[19] HE B B, FU Y, ZU Y, et al. Simultaneous removal of Al^{3+}, Mg^{2+} and F^{-} from wet-process phosphoric acid achieved by a co-precipitation strategy [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 341: 126855.

[20] 江敬安，陈丽，沈兵，等. 世界肥料产业发展趋势及展望[J]. 现代化工，2023，43(1)：13-20.

[21] 舒艺周，马航，匡家灵，等. 湿法磷酸萃余酸用于肥料制备的研究综述[J]. 磷肥与复肥，2022，37(11)：19-21，24.

本文编辑：苗　变