

碱激发法制备偏高岭土基地聚物保温材料

李海波, 魏莉, 门爽

(沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 以偏高岭土和凹凸棒土为原料, 水玻璃(速溶硅酸钠)、氢氧化钠为复合碱激发剂制备地质聚合物(简称地聚物)保温材料。通过热力学计算验证化学反应的自发性, 并分析凹凸棒土用量及不同激发剂模数对材料性能的影响。结果表明, 当凹凸棒土含量为10%、水玻璃模数为1.2时, 材料的导热系数为 $0.108 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 抗压强度为 12.89 MPa , 密度为 $0.963 \text{ g}/\text{cm}^3$, 孔隙率为32.1%, 体积收缩率为15.36%, 表现出良好的隔热保温性能。

关键词: 碱激发法; 偏高岭土; 抗压强度; 导热系数; 地聚物

中图分类号: TQ177

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.009

Preparation of Metakaolin Based Geopolymer Thermal Insulation Materials by Alkali Excitation

LI Haibo, WEI Li, MEN Shuang

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The geopolymer-based thermal insulation materials were prepared using metakaolin and attapulgite as primary raw materials, with a composite alkali activator system comprising waterglass (sodium silicate solution) and sodium hydroxide. The thermodynamic feasibility of the chemical reactions was rigorously evaluated, and the effects of attapulgite content and alkali activator modulus on the materials properties were systematically investigated. Experimental results demonstrate that when the content of attapulgite is 10% with a sodium silicate modulus of 1.2, the materials achieve optimum thermal insulation performance, exhibiting a thermal conductivity of $0.108 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, compressive strength of 12.89 MPa , bulk density of $0.963 \text{ g}/\text{cm}^3$, porosity of 32.1%, and volume shrinkage of 15.36%.

Key words: alkali excitation; metakaolin; compressive strength; coefficient of thermal conductivity; geopolymer

在当前全球面临气候变化和能源危机的背景下^[1], 人们的低碳环保意识增强, 逐渐重视节能型保温建筑材料的应用。地聚物被认为是最具潜力的绿色胶凝材料之一, 具有碳排放量低^[2]、耐腐蚀和耐高温^[3-4]等优点, 同时兼具优异的物理化学稳定性及良好的机械性能等, 广泛应用于耐火材料^[5]、建筑材料^[6]以及混凝土^[7]等领域。

近年来, 国内外学者对不同种类地聚物的性能进行了深入研究^[8]。黄加兴等^[9]以粉煤灰为原料, 添加SiC发泡剂和 Na_2CO_3 、MgO等助熔剂制备了导热系数为 $0.16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、抗压强度为 0.67 MPa 的轻质多孔保温材料, 但强度仍有提高空间。李南等^[10]制备了赤泥基发泡轻质保温材料, 其密度为 $479 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、抗折强度为 0.41 MPa 、抗

压强度为 1.15 MPa、导热系数为 0.09 W/(m·K),但需将其在 1 150 °C 温度下进行烧结,能源消耗较大。殷慧等^[11]研究发现偏高岭土在碱性激活剂的作用下生成的网架结构具有一定强度。姜天华等^[12]以矿渣-粉煤灰为原料,研究了水玻璃模数对材料力学性能的影响,结果发现水玻璃模数增加,材料的抗压强度先提升后下降。

为减少能源消耗,提高材料的强度,选择合适的地聚物种类和碱激活剂对材料的力学性能十分重要。本文以偏高岭土和凹凸棒土为主要原料,以水玻璃和氢氧化钠为复合碱激活剂,制备高强偏高岭土基复合地聚物保温材料。研究碱性过程的物理化学反应,通过反应的热力学计算,验证体系化学反应发生的可能性,探讨凹凸棒土用量和水玻璃模数对材料的力学性能和保温性能的影响。

1 实验部分

1.1 原料

偏高岭土,由高岭土在 800 °C 的温度下煅烧而成,粒度为 1 250 目,主要成分为石英(SiO₂)和

三氧化二铝(Al₂O₃),山西星乐高岭土有限公司。凹凸棒土,粒度为 325 目,主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃,河南铂润铸造材料有限公司。固体水玻璃(Na₂SiO₃),白色颗粒,河南铂润铸造材料有限公司。氢氧化钠(NaOH),白色半透明片状或粒状结晶,天津市大茂化学试剂厂。

1.2 样品制备

按照一定比例称取定量偏高岭土和凹凸棒土,放入搅拌锅中,以 100 r/min 的转速搅拌 5 min,混合均匀,然后加入适量去离子水,以 800 r/min 的转速继续搅拌 15 min,直至成为均匀混合的浆体。加入调配好的水玻璃和 NaOH 复合的碱激活剂,以 1 000 r/min 的转速搅拌 25 min,形成胶凝浆料,放置在模具中成型,在电热恒温鼓风干燥箱中设置温度为 60 °C 干燥至恒重,最后脱模形成待测样品,工艺流程如图 1 所示。

1.3 性能测试

采用热流法导热仪(HFM 446 Lambda small 型,德国耐驰仪器制造有限公司)测试样品的导热系数,样品尺寸为 150 mm × 150 mm × 5 mm,设定上板温度为 35 °C,下板温度为 15 °C,将其放入导

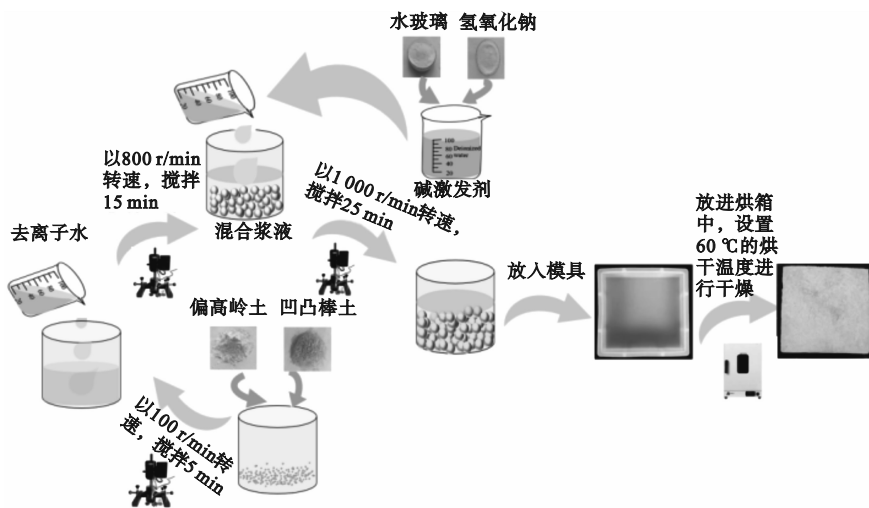


图 1 工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram

热仪中,按 GB/T 10295—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法》对样品导热系数进行测定。

采用万能试验机(YAW-300D 型,深圳三思纵横科技股份有限公司)测试样品的抗压强度,样品尺寸为 30 mm × 30 mm × 30 mm,将其放入微机控制电子万能试验机的平台中间,逐渐增加载荷直至样品受到破坏,根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂

强度检验方法》对样品的抗压强度进行检测。

干密度测定:将尺寸为 150 mm × 150 mm × 5 mm 的样品养护 28 d 后放入烘箱中烘干至恒重,取出样品冷却至室温称重,测试其体积,计算干密度。

通过样品的初始体积与干燥 28 d 后样品体积的差值,计算出样品的体积变化,再计算出体积收缩率。

使用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku Ultima IV

型,理学电企仪器有限公司)对样品晶体结构与物相种类进行测试分析。X 射线衍射仪采用 Cu 靶,扫描角度为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$,扫描速度为 $10(^{\circ})/\text{min}$ 。

使用压汞仪 (MIP, Micromeritics Autopore IV9500, 美国麦克仪器公司)测试样品的孔隙率,汞表面张力为 0.48 N/m ,接触角设置为 130° 。

2 结果与分析

2.1 原料的基本特性

2.1.1 化学组成

偏高岭土和凹凸棒土的化学组成分别见表

表 1 偏高岭土的化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of metakaolin (mass percentage)

%

| 组分 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | MgO | CaO | K ₂ O | Na ₂ O |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|-----|------------------|-------------------|
| 含量 | 52.6 | 45.5 | 0.4 | 0.68 | 0.2 | 0.1 | 0.06 | 0.03 |

表 2 凹凸棒土的化学组成(质量分数)

Table 2 Chemical composition of attapulgite (mass percentage)

%

| 组分 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | K ₂ O | Na ₂ O |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------------------|-------------------|
| 含量 | 55.7 | 9.5 | 5.8 | 0.61 | 10.9 | 1.56 | 1.21 | 0.09 |

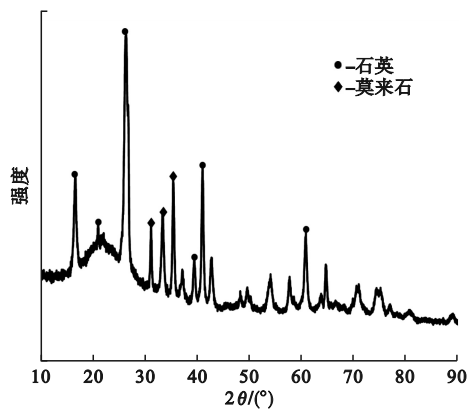


图 2 偏高岭土 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of metakaolin

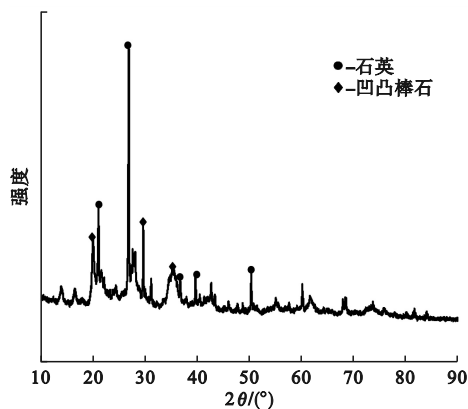


图 3 凹凸棒土 XRD 图谱

Fig. 3 XRD pattern of attapulgite

处存在特征峰)。这种非晶-晶相复合结构显著提升了材料的表面活性和硅铝组分的溶出能力,为其在胶凝体系中的高效反应提供了结构基础。

凹凸棒土作为一种天然层状硅酸盐粘土矿物,其独特的链层状结构及优异的性能受到了广泛关注,其 XRD 图谱如图 3 所示。

由图 3 可知,凹凸棒土的主要物相有凹凸棒石和石英,衍射峰形尖锐且基线平整,表明材料具有高度有序的晶体结构,这种特殊的晶体化学特征赋予其优异的吸附性能和热稳定性。

1、表 2。

2.1.2 原料的物相分析

偏高岭土的 XRD 图谱如图 2 所示。

由图 2 可知,偏高岭土在衍射角 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围内存在宽化衍射峰,表明材料中存在大量非晶态相。主要结晶相为石英 (SiO₂) 和少量莫来石 (Al₆Si₂O₁₃),其中石英的尖锐衍射峰(如衍射角 26.6°)证实其为原料中的伴生矿物。偏高岭土经 800°C 煅烧后,使高岭石 (Al₂Si₂O₅(OH)₄) 晶体结构完全解离,大部分转变为高反应活性的非晶态偏高岭土,同时部分 Al-Si 组分通过固相反应重结晶,形成莫来石晶相(如衍射角 31.3° 、 33° 、 35.5°

2.2 碱激发剂-复合地聚物反应体系的热力学分析

通过对碱激发体系可能发生的化学反应进行热力学计算,获得体系化学反应的方向与限度,从而确定碱激发体系反应的可能性。

2.2.1 热力学基础数据

复合地聚物与 NaOH 和 Na₂SiO₃ 的混合溶液反应非常复杂,本文仅探讨 25°C (298 K) 标准条件下反应生成各种不同产物时的吉布斯自由能变化。反应物与生成物的热力学基本数据见表 3。

表3 反应物与生成物的热力学基本数据

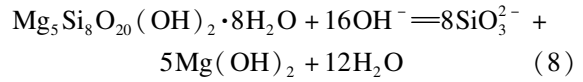
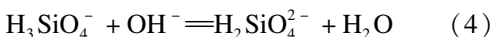
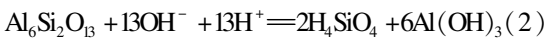
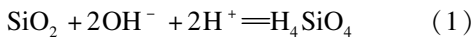
Table 3 Thermodynamic fundamental data of starting materials and products

| 物质 | $\Delta_f H_{298}^\ominus /$ (kJ·mol ⁻¹) | $\Delta_f G_{298}^\ominus /$ (kJ·mol ⁻¹) | $\Delta_f S_{298}^\ominus /$ (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹) |
|--|---|---|---|
| H ₄ SiO ₄ ^[13-15] | -1 460.9 | -1 309.2 | 179.751 |
| H ₃ SiO ₄ ^{-[13-14]} | -1 426.33 | -1 251.644 | 112.711 |
| H ₂ SiO ₄ ^{2-[13-14]} | -1 396.62 | -1 184.867 | -12.989 |
| HSiO ₄ ^{3-[13-14]} | — | -1 158.089 | — |
| SiO ₄ ^{4-[13-14]} | -1 352.69 | -1 089.472 | -402.659 |
| OH ^{-[13-15]} | -230 | -157.2 | -10.559 |
| Al(OH) ₃ ^[16-17] | — | -1 137.617 | 71.128 |
| H ₂ O ^[18] | — | -237.129 | — |
| Al(OH) ₄ ^{-[17,19]} | — | -1 304.524 | 103.546 |
| H ^{+[20]} | 0 | 0 | 0 |
| Al ₆ Si ₂ O ₁₃ ^[21-22] | -6 819.21 | -6 901.17 | 274.89 |
| SiO ₂ ^[21-22] | -910.86 | -923.22 | 41.46 |
| Mg(OH) ₂ ^[20] | -924.54 | -833.56 | 63.137 |
| SiO ₃ ^{2-[20]} | -1 077.02 | -1 088 | — |
| Mg ₅ Si ₈ O ₂₀ (OH) ₂ ·8H ₂ O ^[20] | — | -12 366.051 | — |

2.2.2 碱性激发剂与复合地聚物反应

碱激发剂采用 NaOH 和 Na₂SiO₃ 的混合溶液,在 Na₂SiO₃ 溶解于水的过程中,发生了复杂的物理化学变化,成为一种复杂的胶体溶液。由于 Na₂SiO₃ 是一种强碱弱酸盐,所以其溶液呈碱性。

SiO₂、Al₆Si₂O₁₃ 等铝硅组分在碱性溶液中的溶解分两步进行。首先 Si—O—Si、Si—O—Al 在水作用下解聚和水解,形成 Si(OH)₄ 和 Al(OH)₃,溶液呈水化状态且极不稳定。然后 Si(OH)₄ 和 Al(OH)₃ 在 OH⁻ 作用下迅速解离,形成 SiO₄⁴⁻ 和 Al(OH)₄⁻ 并溶解于碱性溶液。凹凸棒石的硅氧四面体结构在碱性条件下逐渐溶解,溶液中的 OH⁻ 攻击 Si—O—Si 键,使其发生断裂,生成 SiO₄⁴⁻ 进入溶液。而且凹凸棒石晶体结构中的 Mg²⁺ 会有部分溶出,形成氢氧化物沉淀。由于凹凸棒石的晶体结构较稳定,溶解反应通常进行得比较缓慢。体系中可能发生的反应如下。



标准状态下各反应的吉布斯自由能变化 ($\Delta_r G_m$) 计算结果见表4。

表4 标准状态下各反应的吉布斯自由能计算结果

Table 4 Calculation of Gibbs free energy for each reaction under standard state conditions

| 反应 | $\Delta_r G_m /$ (kJ·mol ⁻¹) |
|----|--|
| 1 | -71.580 |
| 2 | -499.332 |
| 3 | -22.373 |
| 4 | -13.152 |
| 5 | -53.151 |
| 6 | -11.312 |
| 7 | -9.707 |
| 8 | -836.097 |

根据热力学判据, $\Delta_r G_m < 0$ 时反应自发正向进行, $\Delta_r G_m > 0$ 时反应非自发, $\Delta_r G_m = 0$ 时反应达平衡态。表4中各反应的 $\Delta_r G_m$ 均为负值,表明反应在标准状态下均能自发进行。以此热力学计算为理论基础,系统研究凹凸棒土用量(质量分数0%~40%)及水玻璃模数(1.0~1.8)对地质聚合物抗压强度、导热系数、孔隙率、干密度及体积收缩率的影响。

2.3 凹凸棒土用量对复合地聚物性能的影响

保持水玻璃模数为1.2,考察凹凸棒土用量对复合地聚物抗压强度、导热系数、孔隙率、干密度、体积收缩的影响,并进行分析。

2.3.1 凹凸棒土用量对复合地聚物抗压强度的影响

凹凸棒土用量对复合地聚物抗压强度的影响如图4所示。

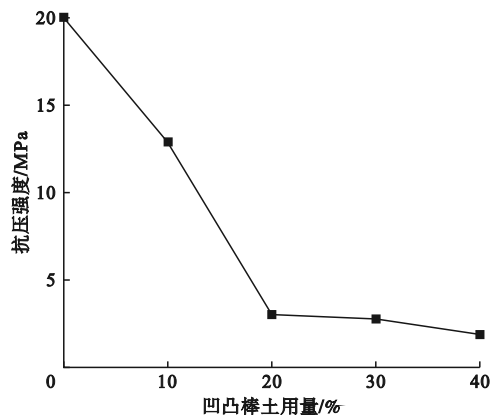


图4 凹凸棒土用量对复合地聚物抗压强度影响
Fig. 4 Effect of attapulgite content on compressive strength of composite geopolymer

由图 4 可知,抗压强度随凹凸棒土用量增加从初始的 20 MPa 降至 1.89 MPa,呈递减趋势。这是因为偏高岭土作为高活性矿物掺合料,其晶体结构中富含 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 与 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 四面体单元,在碱性激发条件下,四面体单元能够迅速解聚并发生缩聚反应,通过 Si—O—Al 键的不断重构,形成具有高度有序性的三维网络结构,该结构赋予材料优异的力学性能,而凹凸棒土含量的增加使未反应的惰性粉末在基体中逐渐累积,导致凝胶相分布出现显著的不均匀性,形成结构缺陷,最终造成力学性能下降。

2.3.2 凹凸棒土用量对复合地聚物导热系数的影响

凹凸棒土用量对复合地聚物导热系数的影响如图 5 所示。

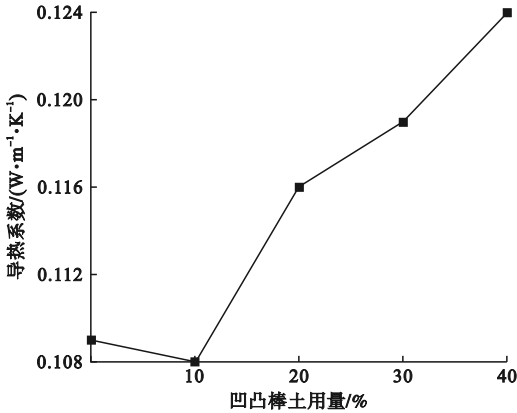


图 5 凹凸棒土用量对复合地聚物导热系数影响
Fig. 5 Effect of attapulgite content on thermal conductivity of composite geopolymer

由图 5 可知,随着凹凸棒土用量的增加,复合地聚物材料导热系数先降低后增加,在凹凸棒土用量为 10% 时,达到最小值 0.108 W/(m·K),此时的保温性能最好,此后随凹凸棒土用量增加单调上升至 0.124 W/(m·K)。这是因为在凹凸棒土用量较低时,形成连续且有序的导热通路,减少了热传导过程中的能量损耗,使材料整体导热系数降低。当用量超过 10% 时,随着导热通路的增多,热流在材料内部的传输阻力减小,热流运输能力大幅提升。此时,材料内部的热传导效率显著增强,最终导致材料整体导热性能提升。

2.3.3 凹凸棒土用量对复合地聚物孔隙率的影响

凹凸棒土用量对复合地聚物孔隙率的影响如图 6 所示。

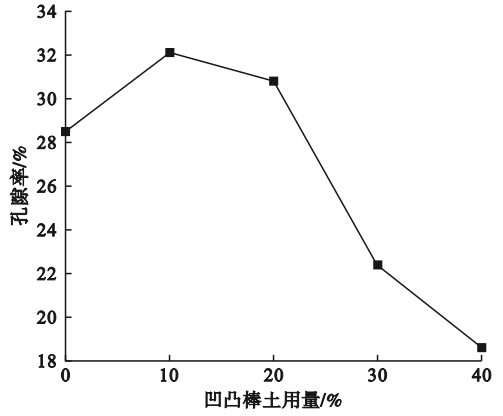


图 6 凹凸棒土用量对复合地聚物孔隙率影响
Fig. 6 Effect of attapulgite content on the porosity of composite geopolymer

由图 6 可知,材料的孔隙率随凹凸棒土用量呈现先升后降的非线性变化。当凹凸棒土用量由 0% 增至 20% 时,孔隙率从 28.5% 升高至 30.8%,且在凹凸棒土用量为 10% 时,孔隙率最高为 32%,这是因为偏高岭土在碱性条件下会发生聚合反应形成地聚物基体,凹凸棒土的加入会阻碍偏高岭土的紧密堆积,使基体的致密化过程受到影响,难以形成紧密结构,从而形成更多孔隙,导致孔隙率上升;当凹凸棒土用量由 30% 升至 40% 时,孔隙率从 22.4% 下降至 18.6%,这是由于凹凸棒土用量过高时,容易发生团聚现象,团聚体的形成使有效堆积密度增加,表现为材料的孔隙率下降。

2.3.4 凹凸棒土用量对复合地聚物干密度的影响

凹凸棒土用量对复合地聚物干密度的影响如图 7 所示。

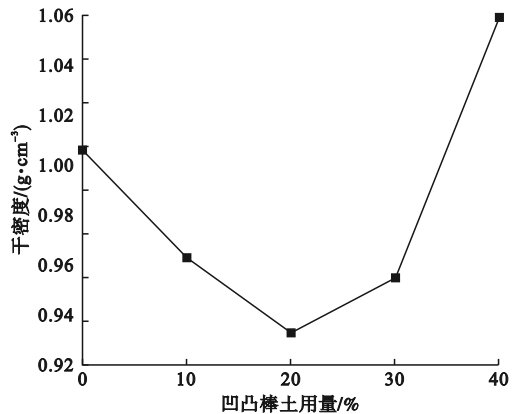


图 7 凹凸棒土用量对复合地聚物干密度影响
Fig. 7 Effect of attapulgite content on dry density of composite geopolymer

由图 7 可知,材料的干密度随凹凸棒土用量增加呈现先降后升的变化趋势。当凹凸棒土用量由

0%增至20%时,孔隙率从28.5%升高至30.8%,对应干密度从 1.006 g/cm^3 下降至 0.933 g/cm^3 ,这是由于纤维状结构的空位阻效应破坏了基体的紧密堆积,导致孔隙率升高,弱化了材料的致密性;当凹凸棒土用量由30%升至40%时,孔隙率从22.4%下降至18.6%,干密度则从 0.933 g/cm^3 增加到 1.059 g/cm^3 ,这是由于纤维状结构逐渐形成连续的空间支撑架构,有效抑制了孔隙发展,促使材料微观结构变得更加致密。

2.3.5 凹凸棒土用量对复合地聚物体积收缩的影响

凹凸棒土用量对复合地聚物体积收缩的影响如图8所示。

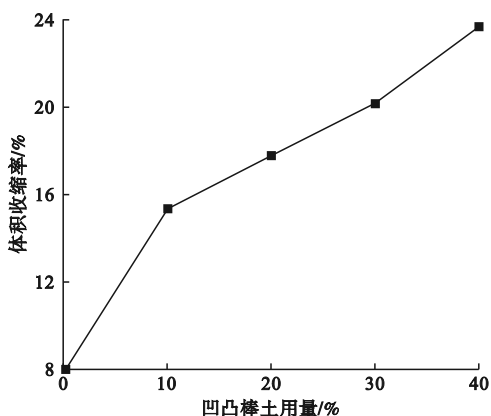


图8 凹凸棒土用量对复合地聚物体积收缩影响

Fig. 8 Effect of attapulgite content on volumetric shrinkage of composite geopolymer

由图8可知,参照水泥养护测试时间,本文选择养护28 d进行样品性能测试。养护28 d的体积收缩率随凹凸棒土用量增加从7.84%增加至23.73%,呈单调递增趋势。体积收缩归因于:凹凸棒土的高比表面积和层状结构特性导致其具有显著的水分吸附-脱附行为,在固化过程中产生明显的毛细管收缩效应;在碱性激发条件下,凹凸棒土中的活性硅铝相与偏高岭土发生竞争性聚合反应,形成不稳定的过渡态凝胶结构;快速的水化放热过程导致局部温度梯度,引发非均匀收缩应力。这些多尺度耦合作用导致材料体积稳定性降低。

2.4 水玻璃模数对复合地聚物性能的影响

由图4~8可知,凹凸棒土用量在10%时,综合性能最优。保持凹凸棒土用量为10%,水玻璃模数为(1.0~1.8),考察水玻璃模数对复合地聚物的抗压强度、导热系数、孔隙率、干密度、体积收缩的影响规律。

2.4.1 水玻璃模数对复合地聚物抗压强度的影响

水玻璃模数对复合地聚物抗压强度的影响如

图9所示。

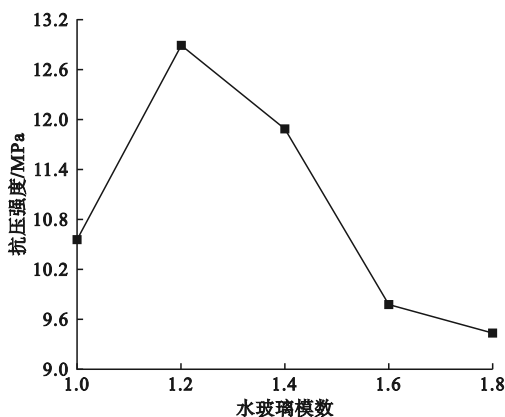


图9 水玻璃模数对复合地聚物抗压强度影响

Fig. 9 Effect of sodium silicate modulus on compressive strength of composite geopolymer

由图9可知,水玻璃模数为1.2时抗压强度达到峰值(12.89 MPa),随后抗压强度随模数增加下降至9.44 MPa,这是因为水玻璃作为地质聚合反应的关键激发剂,其模数直接决定体系的碱性环境。高模数条件下 Na_2O 含量降低导致体系pH下降,碱性环境减弱,不足以提供地质聚合反应所需的基本环境,阻碍了三维地质聚合物网络结构的充分形成,导致材料力学性能劣化。

2.4.2 水玻璃模数对复合地聚物导热系数的影响

水玻璃模数对复合地聚物导热系数的影响如图10所示。

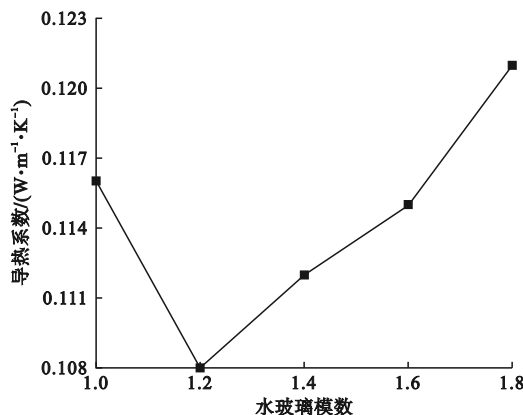


图10 水玻璃模数对复合地聚物导热系数影响

Fig. 10 Effect of sodium silicate modulus on thermal conductivity of composite geopolymer

由图10可见,材料的导热系数随水玻璃模数增加呈现先降后升的变化趋势。当模数为1.2时导热系数最低,为 $0.108 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,模数从1.2增至1.8时,导热系数逐渐上升至 $0.121 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,这是由于高模数水玻璃中增加的 SiO_2 促进 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体单元的交联聚合,形成更致密的三维硅氧网络结构,该结构有利于热量的传递,从而显著提

升了材料的热传导性能。

2.4.3 水玻璃模数对复合地聚物孔隙率的影响

水玻璃模数对复合地聚物孔隙率的影响如图 11 所示。

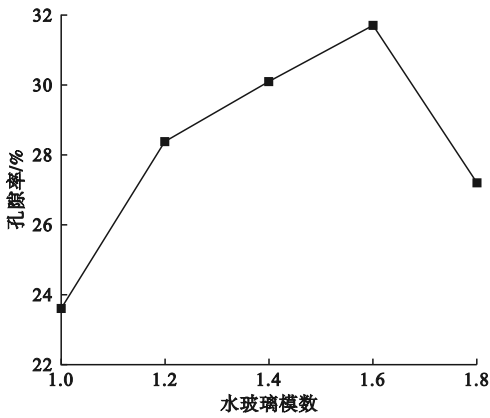


图 11 水玻璃模数对复合地聚物孔隙率影响

Fig. 11 Effect of sodium silicate modulus on the porosity of composite geopolymer

由图 11 可见,孔隙率随水玻璃模数增大呈先升后降的变化趋势。在低模数范围(由 1.0 增至 1.4)时,孔隙率从 23.6% 增加到 30.1%,低模数水玻璃参与反应时,由于 SiO_2 含量相对较低,形成的硅铝酸盐聚合物结构不够致密,无法有效填充孔隙,使得材料内部形成较多的孔隙,孔隙率升高;当模数由 1.6 提升至 1.8 时,孔隙率从 31.7% 下降到 27.2%,高模数水玻璃提供了更多的硅源,使生成的硅铝酸盐聚合物链增长,交联程度增加,形成更加致密的三维网状结构。这种致密结构能够有效填充孔隙,减少材料内部的孔隙数量和大小,从而降低孔隙率。

2.4.4 水玻璃模数对复合地聚物干密度的影响

水玻璃模数对复合地聚物干密度的影响如图 12 所示。

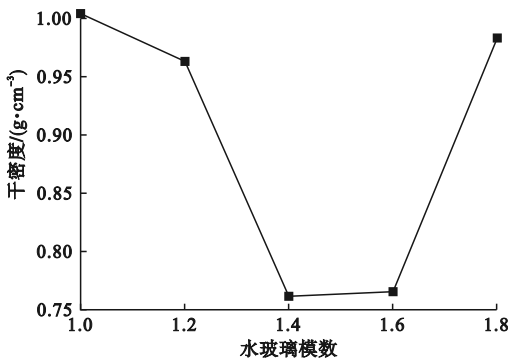


图 12 水玻璃模数对复合地聚物干密度影响

Fig. 12 Effect of sodium silicate modulus on dry density of composite geopolymer

由图 12 可见,干密度随水玻璃模数增大呈现先下降后升高的非单调变化趋势。在低模数范围(由 1.0 增至 1.4)时,孔隙率从 23.6% 增加到 30.1%,干密度从 1.004 g/cm^3 下降至 0.762 g/cm^3 ,这是由于硅酸根离子聚合程度较低,形成松散的无定形凝胶网络结构,孔隙率升高,导致干密度下降;当模数由 1.6 提升至 1.8 时,孔隙率从 31.7% 下降到 27.2%,干密度从 0.766 g/cm^3 增加到 0.983 g/cm^3 ,这是因为高聚合度的硅酸根离子通过更强的缩聚反应形成三维网络结构,其分子链间的交联作用产生显著的“架桥效应”,使孔隙率降低,从而使材料密度显著提高,表明硅酸盐聚合度对材料微观结构构筑起关键调控作用。

2.4.5 水玻璃模数对复合地聚物体积收缩的影响

水玻璃模数对复合地聚物体积收缩的影响如图 13 所示。

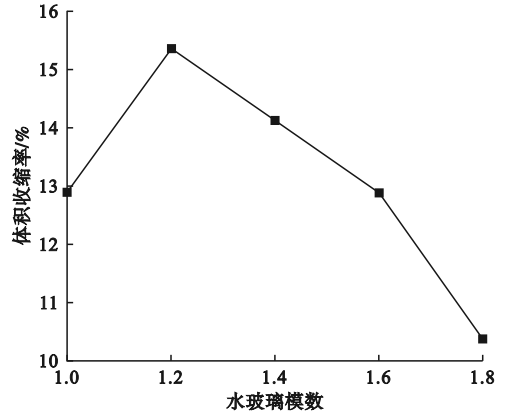


图 13 水玻璃模数对复合地聚物体积收缩影响

Fig. 13 Effect of sodium silicate modulus on volumetric shrinkage of composite geopolymer

由图 13 可见,体积收缩率随水玻璃模数增大呈先上升再下降的趋势。当模数由 1.0 增至 1.2 时,体积收缩率从 12.89% 增至 15.36%,这是因为模数较低时 Na_2O 含量高而 SiO_2 不足,难以形成稳定的网络结构,使水玻璃在硬化过程中形成的硅酸盐网络结构较弱,固化时无法有效抵抗收缩应力,导致材料的体积稳定性较差,收缩率较高;随着模数从 1.2 增加到 1.8 时,体积收缩率从 15.36% 降至 10.38%,这是因为 SiO_2 含量增加,形成更致密的硅酸凝胶网络,虽仍有水分蒸发引起收缩,但致密网络结构可有效抵抗收缩应力,使收缩率降低。

3 结论

本文研究了不同配比的偏高岭土基复合地质

聚合物保温材料,通过热力学计算验证了碱性条件下化学反应的可行性,并分析了凹凸棒土含量和水玻璃模数对材料性能的影响。当凹凸棒土含量为10%、水玻璃模数为1.2时,导热系数为 $0.108 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,抗压强度为 12.89 MPa ,密度为 $0.963 \text{ g}/\text{cm}^3$,孔隙率为32.1%,体积收缩率为15.36%,材料表现出良好的隔热保温性能。

参考文献 (References):

- [1] LI J B, ZHAI Z H, LI H Y, et al. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 442: 140967.
- [2] FAROOQ F, JIN X, FAISAL JAVED M, et al. Geopolymer concrete as sustainable material; a state of the art review [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124762.
- [3] LIU J R, XU Y D, ZHANG W S, et al. Solidification performance and mechanism of typical radioactive nuclear waste by geopolymers and geopolymer ceramics; a review [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2024, 169: 105106.
- [4] AMAR M, LADDURI B, ALLOUL A, et al. Microstructure and mechanical properties of geopolymers utilizing excavated soils, metakaolin and slags [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 86: 108755.
- [5] VALANIDES M, AIVALIOTIS K, OIKONOMOPOULOU K, et al. Geopolymerization of recycled glass waste; a sustainable solution for a lightweight and fire-resistant material [J]. *Recycling*, 2024, 9(1): 16.
- [6] 亢选雄, 叶国华, 朱思琴, 等. 含钒页岩提钒尾渣资源化利用研究进展 [J]. *现代化工*, 2023, 43(6): 67-73.
KANG X X, YE G H, ZHU S Q, et al. Research progress on utilization of tailings after vanadium extraction from vanadium-bearing shale [J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(6): 67-73. (in Chinese)
- [7] 高绮, 刘霖, 宋向阳, 等. 矿渣地质聚合物增强水泥固化 Zn^{2+} 及苯酚污染土强度研究 [J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(1): 77-81.
GAO Q, LIU L, SONG X Y, et al. Enhancing strength of cement solidified Zn^{2+} and phenol contaminated soil with slag geopolymer [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 43(1): 77-81. (in Chinese)
- [8] CONG P L, CHENG Y Q. Advances in geopolymer materials; a comprehensive review [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 8(3): 283-314.
- [9] 黄加兴, 李爱民, 王雪雪. 粉煤灰制备轻质多孔保温材料研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2023, 63(4): 359-366.
HUANG J X, LI A M, WANG X X. Study of preparation of lightweight porous thermal insulation material from fly ash [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2023, 63(4): 359-366. (in Chinese)
- [10] 李南, 陈晨, 耿志涛, 等. 赤泥基发泡轻质保温材料的制备与性能研究 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(8): 150-153, 159.
LI N, CHEN C, GENG Z T, et al. Preparation and properties of red mud based foamed light thermal insulation materials [J]. *New Building Materials*, 2023, 50(8): 150-153, 159. (in Chinese)
- [11] 殷慧, 柳华杰, 季成元, 等. 偏高岭土活性影响因素及其碱激发反应研究进展 [J]. *钻井液与完井液*, 2024, 41(4): 419-426.
YIN H, LIU H J, JI C Y, et al. Progress in studying affecting factors and alkaline-activated reaction of activity of metakaolin [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2024, 41(4): 419-426. (in Chinese)
- [12] 姜天华, 汪文星, 阮英, 等. 基于正交试验的矿渣-粉煤灰地聚物混凝土力学性能研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2025, 23(1): 178-184.
JIANG T H, WANG W X, RUAN Y, et al. Mechanical properties of slag-fly ash geopolymer concrete based on orthogonal test [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2025, 23(1): 178-184. (in Chinese)
- [13] 别特罗壤, 巴布什金, 马特维耶夫. 硅酸盐热力学 [M]. 蒲心诚, 曹建华, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [14] 布拉赫. 矿物学中的热力学方法 [M]. 夏林圻, 译. 北京: 地质出版社, 1982.
- [15] NICOLEAU L, NONAT A, PERREY D. The di- and tricalcium silicate dissolutions [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 47: 14-30.
- [16] SPEIGHT J G. *Lange's handbook of chemistry* [M]. 16th ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [17] TANGER J C, HELGESON H C. Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures; revised equations of state for the standard partial molal properties of ions and electrolytes [J]. *American Journal of Science*, 1988, 288(1): 19-98.
- [18] 王晓华, 李永涛, 许义婷, 等. 氟硅酸制氢氟酸吉布斯自由能的探讨 [J]. *云南化工*, 2024, 51(9): 103-106.
WANG X H, LI Y T, XU Y T, et al. Exploration of Gibbs free energy in the production of hydrofluoric acid from fluorosilicic acid [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2024, 51(9): 103-106. (in Chinese)
- [19] CASTET S, DANDURAND J L, SCHOTT J, et al. Boehmite solubility and aqueous aluminum speciation in hydrothermal solutions (90~350 °C): experimental study and modeling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(20): 4869-4884.
- [20] 林传仙, 白正华, 张哲儒. 矿物及有关化合物热力学数据手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [21] BARIN I, KNACKE O. *Thermochemical properties of inorganic substances* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1973.
- [22] BARIN I, KNACKE O, KUBASCHEWSKI O. *Thermochemical properties of inorganic substances; supplement* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.

(责任编辑: 徐淑姣)