文章编号:1007-9629(2022)08-0773-08

偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉对水泥石微观 结构和性能的影响

杜渊博, 葛 勇*

(哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江哈尔滨 150090)

摘要:研究了偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉对水泥石强度和热膨胀系数的影响.并采用热重分析仪、 压汞仪和扫描电镜分析了不同水泥石的水化产物、孔结构和微观形貌.结果表明:偏高岭土、玻璃粉 和石灰石粉的掺入可以降低水泥石的热膨胀系数,并且降低程度随着其掺量的增大而增大;掺加偏 高岭土的水泥石中水化产物增多,孔隙率降低,微观结构致密,抗压强度增大,热膨胀系数减小;掺加 玻璃粉的水泥石中水化产物减少,孔隙率增大,强度和热膨胀系数的降低幅度较大;掺加石灰石粉的 水泥石强度和热膨胀系数的降低幅度最大.

Effects of Metakaolin, Glass Powder and Limestone Filler on Microstructure and Properties of Cement Paste

DU Yuanbo, GE Yong^{*}

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The effects of metakaolin, glass powder and limestone powder on the strength and thermal expansion coefficient of cement paste were studied. The hydration products, pore structure and microstructure of cement paste were also studied by thermogravimetric analyzer, mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscope. The results show that the thermal expansion coefficient of cement paste decreases with the increase of content of metakaolin, glass powder or limestone powder. The addition of metakaolin can increase the hydration product, decrease the porosity, improve the microstructure, increase the compressive strength and decrease the thermal expansion coefficient of glass powder can decrease the hydration product, increase the porosity, and greatly reduce the strength and thermal expansion coefficient of cement paste; the strength and thermal expansion coefficient of cement paste; the strength and thermal expansion coefficient of cement paste with limestone powder decrease the most.

Key words: cement paste; thermal expansion coefficient; metakaolin; glass powder; limestone powder

混凝土作为一种多相复合材料,一般由水泥石、 骨料和界面过渡区组成.其中水泥石的热膨胀系数 介于10×10⁻⁶~20×10⁻⁶℃⁻¹之间,而骨料的热膨胀 系数为5×10⁻⁶~12×10⁻⁶℃^{-1[1-2]}.水泥石的热膨胀 系数一般大于骨料的热膨胀系数.当混凝土的温度 发生变化时,两者之间的热变形存在差异,进而导致 混凝土内部应力的产生.当内应力超过混凝土的极 限强度时,混凝土便产生裂纹,最终导致混凝土力学 性能和耐久性能降低^[34].因此有必要研究水泥石的 热膨胀系数.

收稿日期:2021-07-05;修订日期:2021-09-06

基金项目:国家国际科技合作专项项目(ISTCP 2014DFR81000)

第一作者:杜渊博(1987—),男,陕西宝鸡人,哈尔滨工业大学博士生.E-mail: 915439482@qq.com

通讯作者:葛 勇(1962-),男,陕西榆林人,哈尔滨工业大学教授,博士生导师,博士. E-mail: geyong@hit.edu.cn

水泥石的热膨胀系数在初凝时刻出现最大值, 而后随着龄期的增加迅速减小,在终凝时刻达到最 小值,之后又随着龄期的增加而缓慢增大^[5].在同一 龄期时,水泥石的热膨胀系数随水灰比的增大而减 小^[6].此外,粉煤灰、矿粉和硅灰等矿物掺和料的掺入 有助于降低水泥石的热膨胀系数^[7].近些年来,不少 学者^[8+0]的研究表明偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉也 可以作为矿物掺和料用于混凝土的生产.这样不仅 可以提高混凝土的抗渗性和耐蚀性,还可以减少废 弃玻璃和煤矸石等废弃物对环境的污染,因此它们 有望作为粉煤灰,矿粉和硅灰的替代品.然而目前有 关偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉对水泥基材料的影 响研究主要集中在力学性能和耐久性能上,对于水 泥基材料热膨胀性能的影响研究比较少. 鉴于此,本文研究了偏高岭土、玻璃粉和石灰石 粉对水泥石强度和热膨胀系数的影响规律,并利用 热重分析仪、压汞仪和扫描电镜对其影响机理进行 分析,以期为偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉在混凝土 中的应用以及抑制混凝土温度开裂提供指导依据.

1 试验

1.1 原材料及试样制备

水泥(C)为曲阜中联水泥有限公司生产的基准 水泥,偏高岭土(MK)由内蒙古超牌建材科技有限公 司提供,玻璃粉(GP)由聊城莘县伟明建筑材料加工 厂提供,石灰石粉(LF)由哈尔滨阿城万顺石材钙粉 加工厂提供.4种原材料的化学组成¹¹见表1,粒径分 布见图1.拌和用水为自来水.

表1 原材料的化学组成 Table 1 Chemical composition of raw materials

								W/ 70
Material	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	SiO_2	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	CaO	MgO	Na ₂ O	SO_3	IL
Cement	4.49	21.88	3.45	64.65	2.36	0.51	2.44	1.31
Metakaolin	45.41	51.44	0.43	0.15	0.01	0.22	0.15	0.43
Glass powder	2.18	71.21	0.38	10.14	1.52	12.87	0.18	1.60
Limestone powder	1.47	2.35	0.36	54.89	0.53	0.08	0.05	43.73



1.2 配合比及试样制备

水泥石的配合比见表2.将预先称好的水泥和矿 物掺和料在水泥净浆搅拌机中慢速干搅10min,使其 混合均匀,根据GB/T1346—2011《水泥标准稠度用 水量、凝结时间、安定性检验方法》,加水搅拌,注入 尺寸为φ5×25mm的模具内.成型后的试样在室温 下养护2d后拆模,再将试样置于标准养护室((20± 1)℃,相对湿度RH≥98%)内养护至28d,用于热膨胀 系数测定.同时制备尺寸为40mm×40mm×160mm 的水泥石试样,在相同环境下养护28d,用于强度测试和微观分析.

表 2 水泥石的配合比 Table 2 Mix proportions of cement pastes

Sample	Water-	Mix proportion(by mass)/%						
No.	binder ratio	Cement	Metakaolin	Glass powder	Limestone powder			
PC	0.41	100	0	0	0			
MK8	0.41	92	8	0	0			
MK16	0.41	84	16	0	0			
MK24	0.41	76	24	0	0			
GP8	0.41	92	0	8	0			
GP16	0.41	84	0	16	0			
GP24	0.41	76	0	24	0			
LF8	0.41	92	0	0	8			
LF16	0.41	84	0	0	16			
LF24	0.41	76	0	0	24			

1.3 测试方法

将尺寸为 φ5×25 mm的水泥石试样真空干燥至 恒重,采用德国耐驰公司生产的402EP型热膨胀仪 测定其热膨胀系数,仪器测试准确度为0.03× 10⁻⁶℃⁻¹.样品在仪器内自25℃起升温,升温速率为

¹⁾ 文中涉及的组成、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

2 ℃/min,最高温度为85 ℃.热膨胀率随温度变化曲 线由测定仪自动连续记录.

参照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方 法(ISO法)》测定水泥石试件 28 d 的抗压强度和抗折 强度.取强度测试后的水泥石试样碎块,用无水乙醇 浸泡 48 h终止水化,在真空干燥箱内干燥 5 d.部分块 体研磨并过筛(45 μm),制备粉末样品,进行热重分析 (TG);部分块体用于压汞(MIP)和扫描电镜(SEM) 测试.TG测试采用德国Linseis公司生产的L70/2171 型热重分析仪,测试过程中使用氮气作为保护气体,温 度为 25~1000℃,升温速率为 10℃/min.MIP测试采 用美国 Micromeritics 公司生产的 9500型压汞仪,最 大压力为 414 MPa.SEM 测试采用德国蔡司公司生产 的 EVO MA10型扫描电镜,加速电压为2 kV.

2 结果与讨论

2.1 热膨胀系数

掺加偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉后,水泥石热 膨胀系数如图2所示.由图2可见:与纯水泥石PC相 比,掺加偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉后水泥石的热 膨胀系数减小;当偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉的掺 量(用等质量取代水泥的取代率表示)为8%时,水泥 石的热膨胀系数分别降低了10.4%、13.9%和 15.5%;当偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉的掺量为 24%时,水泥石的热膨胀系数分别降低了22.5%、 29.6%和33.3%.由此可见,随着偏高岭土、玻璃粉和 石灰石粉掺量的增加,水泥石热膨胀系数的降低幅 度增大.由图2中还可以看出,在掺量相同的条件下, 掺加偏高岭土水泥石的热膨胀系数最大,掺加玻璃 粉水泥石的次之,掺加石灰石粉水泥石的最小.这表 明掺加石灰石粉可以显著降低水泥石的热膨胀系数.



2.2 抗压强度和抗折强度

掺加偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉后,水泥石的 抗压强度和抗折强度见图 3. 由图 3(a)可知:随着偏 高岭土掺量的增加,水泥石的抗压强度增大;当偏高 岭土的掺量为8%、16%和24%时,水泥石的抗压强 度相比于PC组分别增加了16.1%、29.6%和41.8%. 这主要是由偏高岭土的填充效应和火山灰效应所致 (具体见2.6).由图3(a)还可以看出:随着玻璃粉和石 灰石粉掺量的增加,水泥石的抗压强度降低;当玻璃 粉和石灰石粉的掺量为8%时,水泥石的抗压强度相 比PC组分别降低了6.1%和14.5%;当玻璃粉和石 灰石粉的掺量为24%时,水泥石的抗压强度相比PC 组分别降低了21.3%和44.6%.需要注意的是,在掺 量相同的条件下,掺石灰石粉的水泥石抗压强度低 于掺玻璃粉的水泥石抗压强度.这表明玻璃粉的活 性高于石灰石粉的活性.由图3(b)可知,偏高岭土、 玻璃粉和石灰石粉的掺加对水泥石抗折强度的影响 和抗压强度类似,随着偏高岭土(或玻璃粉和石灰石 粉)掺量的增加,水泥石的抗折强度增加(或降低).





2.3 热重分析

图 4 是各水泥石的热重-差式扫描量热分析 (TG-DSC)曲线.

由图 4(a)可以看出,纯水泥石主要有 3个明显的 吸热峰:100 ℃左右的吸热峰由水化硅酸钙凝胶 (C-S-H)吸热脱水所致;450 ℃左右的吸热峰由氢氧化 钙(Ca(OH)₂)吸热脱水所致;700 ℃左右的吸热峰由碳 酸钙(CaCO₃)吸热分解所致.掺入偏高岭土的水泥石 有 4 个明显的吸热峰,分别位于100、180、450、700 ℃ 处.其中100、450、700 ℃处吸热峰的出现主要归因于 C-S-H、Ca(OH)₂和CaCO₃的吸热分解,而180 ℃左右 的吸热峰是由水化硅铝酸钙(C₂ASH₈)吸热脱水所 致^[11].此外,由图 4(a)还可以看出,随着偏高岭土掺量 的增加,Ca(OH)₂的分解反应吸热峰面积减小.这可 以归因为:偏高岭土与水泥石中的Ca(OH)₂发生了 火山灰反应,从而降低了水泥石中Ca(OH)₂的含量.

由图4(b)、(c)可以看出:掺入玻璃粉和石灰 石粉的水泥石有3个吸热峰,与纯水泥石的结果相 同;区别在于,掺入玻璃粉和石灰石粉后,水泥石中 Ca(OH)₂的分解吸热峰面积较纯水泥石明显减小. 这主要是由于玻璃粉和石灰石粉的稀释效应和火山 灰效应降低了水泥石中Ca(OH)₂的含量.由图4(c) 还可以看出,随着石灰石粉掺量的增加,CaCO₃的分 解吸热峰位置向右移动,并且峰面积增大.这表明石 灰石粉的掺入可以提高水泥石中CaCO₃的分解温度 和含量.Thiery等^[12]的研究表明,CaCO₃的吸热峰温 度随着其结晶度的增大而增大.

Hallet 等^[13]和Liu 等^[14]给出了水泥石中化学结合 水含量(w_b)和Ca(OH)₂含量(w_{CH})的计算式:

$$w_{\mathrm{b}} = w_{\mathrm{30-550\,°C}} \tag{1}$$

$$w_{\rm CH} = \frac{74}{18} \times w_{400-500\,\rm C}$$
 (2)

式中:w₃₀₋₅₅₀℃为水泥石在30~550℃之间的质量损失率; w₄₀₀₋₅₀₀℃为水泥石在400~500℃之间的质量损失率.

根据式(1)、(2)分别计算各水泥石中化学结合 水和Ca(OH)₂的含量,结果如图5所示.由图5(a)可 知:与纯水泥石PC相比,掺加偏高岭土可以提高水 泥石中化学结合水的含量,而掺加玻璃粉和石灰石 粉则降低了水泥石中化学结合水的含量;在掺量相 同的情况下,掺加偏高岭土水泥石的化学结合水含 量最大,掺加玻璃粉水泥石的次之,掺加石灰石粉水 泥石的最小.这表明掺加偏高岭土水泥石的水化产



偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉的火山灰效应和稀释 效应;在掺量相同的条件下,掺加石灰石粉水泥石的 Ca(OH)2含量最大,掺加玻璃粉水泥石的次之,掺加 偏高岭土水泥石的最小.这表明偏高岭土的火山灰活 性最强,玻璃粉的活性次之,石灰石粉的活性最弱.



Fig. 5 Contents of bound water and Ca(OH)₂ in cement pastes

2.4 孔径分布及孔隙率

图6和图7给出了水泥石的孔径分布曲线和孔

隙率(体积分数,下同).由图6(a)和图7可以看出:纯 水泥石的孔隙率为20.24%,孔径分布曲线的峰值为



38.5 nm;掺入偏高岭土后水泥石的孔隙率降低,孔径 分布曲线的峰值明显向孔径小的方向移动;当偏高 岭土的掺量为24%时,水泥石的孔隙率仅为 10.31%,孔径分布曲线的峰值仅为3.0 nm.这表明偏 高岭土的火山灰反应可以显著降低水泥石的孔隙 率,细化水泥石的孔径.由图6(b)和图7可以看出,掺 入玻璃粉后水泥石孔径分布曲线的峰值没有发生变 化(均为38.5 nm),但是掺玻璃粉水泥石的孔隙率较 纯水泥石增大.这主要是由于玻璃粉的活性比水泥熟 料的低,掺入玻璃粉后水泥石的水化产物减少,因此 水泥石的孔隙率增大.同时玻璃粉具有一定的火山灰 活性,可以与Ca(OH)₂发生水化反应生成C-S-H凝 胶,进而改善水泥石中的孔隙结构.在这2种作用的



综合影响下,掺加玻璃粉的水泥石孔径分布曲线的峰 值没有发生变化.由图6(c)和图7可以看出,掺入石 灰石粉后水泥石孔径分布曲线的峰值为75.6 nm,同 时水泥石的孔隙率随着石灰石粉掺量的增加而增大. 这主要归因于石灰石粉的活性较低,在水泥石中主 要起稀释效应,因此掺加石灰石粉水泥石结构较为 疏松.结合图2和图7可以看出,在掺量相同的条件 下,掺加石灰石粉水泥石的孔隙率最大,热膨胀系数 最小;掺加偏高岭土水泥石的孔隙率最小,热膨胀系 数最大.这主要归因于掺加偏高岭土、玻璃粉和石灰 石粉后水泥石中水化产物的改变(见2.2).Shui等^[15] 的研究中也观察到孔隙率较小的水泥石具有较大的 热膨胀系数.

2.5 SEM 分析

图 8 为水泥石的 SEM 照片.由图 8(a)可见,在 纯水泥石中可以观察到明显的C-S-H 凝胶、板状的 Ca(OH)。晶体和针状的AFt晶体,这些水化产物相互 交叉连接,形成致密的微观结构.与纯水泥石相比,试 样MK24中含有更多的C-S-H凝胶,微观结构也更加 致密,见图8(b).此外,试样MK24中几乎看不到板状 的Ca(OH)。晶体和针状的AFt晶体.这种现象可归结 于以下原因:掺加偏高岭土减少了水泥用量,进而减 少了Ca(OH)₂和AFt的生成量;偏高岭土的火山灰 反应可以消耗水泥水化生成的Ca(OH)2;试样MK24 中含有大量的C-S-H凝胶,而C-S-H凝胶可以覆盖

5 µm





(c) GP24



(d) LF24

图8 水泥石的SEM照片 Fig. 8 SEM images of cement pastes

Ca(OH)2晶体和AFt晶体,使其不易被观察到.

由图 8(c)可见,玻璃粉的周围完全被水化产物 覆盖,与水泥石紧密结合.这表明玻璃粉具有一定的 火山灰活性.由图 8(d)可见,石灰石粉颗粒的表面仅 有少量的凝胶状水化产物,这表明石灰石粉在28 d 时水化程度较低.此外,试样 LF25 中的孔隙数量明 显较多,微观结构也较为疏松.这些结果与 TG-DSC 和 MIP 的结果一致.

2.6 影响机制分析

偏高岭土主要是由无定形硅酸铝(Al₂O₃·2SiO₂) 组成,在碱性环境下,偏高岭土会溶出活性的Al₂O₃ 和SiO₂.这些活性物质可以与水泥石中的Ca(OH)₂ 发生水化反应生成大量的水化产物(C-S-H、C₂ASH₈ 和 C₄AH₁₃ 等)^[16]. C-S-H 的 热 膨 胀 系 数 为 15× 10⁻⁶ ℃^{-1[17]},增加水泥石中C-S-H的产量在一定程度 上可以提高水泥石的热膨胀系数.另一方面,偏高岭 土的火山灰反应会消耗水泥石中的Ca(OH), Ca(OH), 的热膨胀系数为25.5×10⁻⁶ ℃^{-1[18]},远远大于水泥石 的热膨胀系数(10×10⁻⁶~20×10⁻⁶ ℃⁻¹),水泥石中 Ca(OH)₂含量的减小必然导致水泥石热膨胀系数的 减小.其中后者占主导地位,因此掺入偏高岭土后水 泥石的热膨胀系数减小(见图2).需要注意的是,偏 高岭土进行火山灰反应生成的水化产物,可以填充 水泥石的内部孔隙,从而减小水泥石的孔隙率,改善 水泥石的孔径分布,使得水泥石的抗压强度和抗折 强度提高(见图3).同时偏高岭土的颗粒粒径较小 (见图1),可以填充水泥颗粒的空隙,增加水泥石的 密实性,提高水泥石的强度.

石灰石粉和玻璃粉的火山灰活性较低.掺加石灰 石粉和玻璃粉后,水泥浆体中有效胶凝材料的含量降 低,使得水化产物减少(水泥石中C-S-H和Ca(OH)₂ 的含量同时降低,见图5和图8),因此与掺加偏高岭 土相比,掺加石灰石粉和玻璃粉可以更显著地降低 水泥石的热膨胀系数(见图2).掺加石灰石粉和玻璃 粉可减少水化产物,使得水泥石的孔隙率增大,进而 使得水泥石的抗压强度和抗折强度降低.与石灰石 粉相比,玻璃粉具有更高的火山灰活性,在掺量相同 的条件下,掺加玻璃粉水泥石的孔隙率更低,强度更 高(见图3).

3 结论

(1)偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉的掺入可以降低水泥石的热膨胀系数,降低程度随着矿物掺和料掺量的增大而增大.在掺量相同的条件下,掺加偏高

岭土水泥石的热膨胀系数最大,掺加玻璃粉水泥石 的次之,掺加石灰石粉水泥石的最小.

(2) 掺加偏高岭土后水泥石的化学结合水含量 增加, 而氢氧化钙含量减少, 热膨胀系数因而降低. 掺加玻璃粉和石灰石粉后, 水泥石的化学结合水和 氢氧化钙含量均减少, 热膨胀系数因而显著降低. 在 掺量相同的条件下, 掺加石灰石粉水泥石的氢氧化 钙含量最大, 掺加玻璃粉水泥石的次之, 掺加偏高岭 土水泥石的最小.

(3)随着偏高岭土的掺量由0%增至24%,水泥 石的孔隙率由20.24%降低为10.31%,孔径分布的 峰值由38.5 nm降低为3.0 nm,致使水泥石的密实度 和强度提高.掺加玻璃粉后水泥石的孔径分布峰值 不变,但孔隙率增大,因此强度降低.掺加石灰石粉 后水泥石的孔隙率和孔径分布峰值均增大,抗压强 度和抗折强度均降低.

参考文献:

- QIANG Z, LI K, FEN-CHONG T, et al. Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1):468-475.
- [2] MEYERS L S. Thermal coefficient of expansion of Portland cement:Long time tests[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1940, 32(8):1107-1112.
- [3] 章瑞,水中和,王桂明.硬化水泥石热膨胀性能的调节及其机 理研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):228-230,233.
 ZHANG Rui, SHUI Zhonghe, WANG Guiming. Adjustment of thermal expansion behaviour of hardened cement paste and its mechanisms [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009,7(6):228-230,233. (in Chinese)
- [4] 玄东兴,水中和,曹蓓蓓.水泥基材料组分热变形差异性研究
 [J].武汉理工大学学报,2007,29(1):30-32.
 XUAN Dongxing, SHUI Zhonghe, CAO Beibei. Investigation on thermal deformation divergence between components of cement-basted materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1):30-32. (in Chinese)
- [5] 黄杰.现代混凝土早龄期热膨胀系数预测模型及其应用[D]. 南京:河海大学,2010.
 HUANG Jie. Prediction model of thermal expansion coefficient of modern concrete and its application in early age[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese)
- [6] 丁士卫.水泥石热变形性能试验研究[D].南京:东南大学, 2006.
 DING Shiwei. Experimental research on thermal deformation of hardened cement paste[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
 (in Chinese)
- [7] SHUI Z H, RUI Z, CHEN W, et al. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (9):1761-1767.

 [8] 史才军,王德辉,贾煌飞,等.石灰石粉在水泥基材料中的作用及对其耐久性的影响[J]. 硅酸盐学报,2017,45(11): 1582-1593.
 SHI Caijun, WANG Dehui, JIA Huangfei, et al. Role of

limestone powder and its effect on durability of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45 (11):1582-1593. (in Chinese)

- [9] 李碧雄, 汪知文, 饶丹, 等. 废玻璃在水泥混凝土中的应用研究评述[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8):2449-2457.
 LI Bixiong, WANG Zhiwen, RAO Dan, et al. Review on application of waste glass in cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8):2449-2457. (in Chinese)
- [10] SHI Z G, SHUI Z H, LI Q, et al. Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 74:57-64.
- [11] BAKOLAS A, AGGELAKOPOULOU E, MOROPOULOU A, et al. Evaluation of pozzolanic activity and physicomechanical characteristics in metakaolin-lime pastes[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2006, 84(1):157-163.
- [12] THIERY M, VILLAIN G, DANGLA P, et al. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics[J]. Cement and Concrete Research, 2007,

37(7):1047-1058.

- [13] HALLET V, DE BELIE N, PONTIKES Y. The impact of slag fineness on the reactivity of blended cements with high-volume non-ferrous metallurgy slag [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257:119400.
- LIU S H, WANG L, LI Q L, et al. Hydration properties of Portland cement-copper tailing powder composite binder [J].
 Construction and Building Materials, 2020, 251:118882.
- [15] SHUI Z H, ZHANG R, CHEN W, et al. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (9):1761-1767.
- [16] ZHAO D D, KHOSHNAZAR R. Microstructure of cement paste incorporating high volume of low-grade metakaolin[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106:42-50.
- [17] ABDOLHOSSEINI QOMI M, ULM F J, PELLENQ R J M. Physical origins of thermal properties of cement paste[J]. Physical Review Applied, 2015, 3(6):064010.
- [18] XU H, ZHAO Y, VOGEL S C, et al. Anisotropic thermal expansion and hydrogen bonding behavior of portlandite: A high-temperature neutron diffraction study[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2007, 180(4):1519-1525.

(上接第772页)

property of its nano composites with EVA [J]. Composite Structures, 2003, 62:391-395.

Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2018, 47(3): 14-21.

of modifiers in multi-component MgO-supported Au catalysts

 [16] 徐嘉欣,颜粉鸽,黄建翠,等.高分散型六角片氢氧化镁的制备 与表征[J].盐科学与化工,2018,47(3):14-21.
 XU Jiaxin, YAN Fenge, HUANG Jiancui, et al. Study on preparation of hexagonal magnesium high dispersion hydroxide[J].

(in Chinese) [17] TOMPOS A, MARGITFALVI J L, SZABÓ E G Y, et al. Role designed for preferential CO oxidation[J]. Journal of Catalysis, 2009, 266(2):207-217.

- [18] GOMES C M, OLIVEIRA A K D S D. Effects of filler cabonates on magnesium-oxide based pastes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262:119913.
- [19] 向兰,金永成,金勇.氢氧化镁的结晶习性研究[J].无机化学学报,2003,19(8):837-841.
 XIANG Lan, JIN Yongcheng, JIN Yong. Study on the growth of magnesium hydroxide crystals[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry,2003,19(8):837-841. (in Chinese)