

掺偏高岭土对蒸养混凝土性能的影响研究

沈黄冰¹, 贺智敏^{1*}, 何建明²

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江广天构件股份有限公司, 浙江 宁波 315212)

摘要: 为改善蒸养混凝土性能, 研究了掺偏高岭土对蒸养混凝土抗压强度、抗氯离子渗透和抗硫酸盐侵蚀性能的影响, 并通过热分析和界面区显微硬度测试, 探讨了偏高岭土对蒸养混凝土的作用机理. 结果表明, 掺偏高岭土显著提高了蒸养混凝土脱模强度和抗氯离子渗透性, 掺量 15% 时效果最佳; 掺偏高岭土大幅提高了蒸养混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能, 其抗折抗蚀系数远高于空白混凝土; 偏高岭土对蒸养混凝土性能的改善机理与其水化时消耗大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 从而提高了界面区显微硬度有关.

关键词: 蒸汽养护; 偏高岭土; 氯离子; 硫酸盐; 显微硬度; 水化

中图分类号: TU52

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 04-0074-07

新型建筑工业化以构件预制化生产、装配式施工为生产模式, 而预制构件主要采用蒸汽养护混凝土技术进行工业化生产. 由于蒸养温度加速了水泥水化, 对比标准养护, 蒸养混凝土通常水化产物分布不够均匀、孔结构偏粗化、易导致耐久性不良^[1-2]. 莫宗云等^[3]研究表明, 用适量矿物掺合料取代部分水泥可改善混凝土性能和微观结构. 偏高岭土是一种火山灰活性较高的矿物掺合料, 目前在标准常温养护混凝土中应用较多, 且取得了较好的改性效果. 有研究表明^[4-6], 将偏高岭土适量取代部分水泥, 提高了胶凝材料体系强度, 尤其是后期强度. 蒋林华^[7]、曾俊杰等^[8]研究了水胶比为 0.35 和 0.40 时掺偏高岭土混凝土的抗氯离子渗透性, 掺 6%、8% 偏高岭土取代水泥显著降低了氯离子扩散系数; Gruber 等^[9]和 Boddy 等^[10]试验也得到了类似结果. 关于偏高岭土对混凝土抵抗硫酸盐溶液侵蚀的影响尚存争议. Lee 等^[11]试验结果表明, 混凝土在 4.2% 硫酸镁溶液中的膨胀随偏高岭土掺量增加而提高, 即偏高岭土会降低混凝土抗硫酸镁溶液的侵蚀能力. 而 Ali 等^[12]研究结果表明, 10% 替代比例的偏高岭土可以明显降低混凝土在 4.2% 的硫酸镁溶液中引起的膨胀破坏. 以上研究

均采用标准养护下的砂浆或混凝土试件, 未考虑热养护条件对试件的影响.

为改善蒸养水泥基材料性能, 曾俊杰等对蒸养净浆和砂浆进行了力学性能的研究, 发现偏高岭土能促进砂浆的早期强度, 细化砂浆的孔结构^[13-14], 但其未涉及混凝土层次. 徐雯雯等^[15]研究了低水胶比下蒸养混凝土的抗压强度和毛细吸水性, 发现复掺偏高岭土和矿渣能提高蒸养混凝土的抗压抗折强度, 降低吸水性, 但其未考虑单掺偏高岭土对蒸养混凝土性能的影响. 纵观已有文献, 有关偏高岭土对蒸养水泥基材料的研究不多, 且大都以净浆和砂浆为试验对象, 对混凝土微观结构与性能的研究仍不充分.

本文拟在蒸汽养护条件下, 以偏高岭土掺量及水胶比为变量, 对蒸养混凝土强度、抗渗、抗硫酸盐等性能进行了研究, 并通过显微硬度和水化过程的热分析测试, 阐明偏高岭土的作用机理, 为偏高岭土在预制混凝土构件生产提供技术支持.

1 实验

1.1 原材料和配合比

水泥为浙江海螺 42.5 级普通硅酸盐水泥(P.O

收稿日期: 2017-09-29.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY17E080007); 宁波市自然科学基金(2015A610300); 宁波大学胡岗优秀博士基金(ZX2014000168).

第一作者: 沈黄冰(1991-), 男, 浙江绍兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土材料. E-mail: shenhuangbing@126.com

*通信作者: 贺智敏(1973-), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 主要研究方向: 混凝土结构耐久性. E-mail: hezhimin@nbu.edu.cn

42.5); 偏高岭土(MK)为市售湖南超牌, 密度 $2.62\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 比表面积 $17\,600\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$; 水泥和偏高岭土的化学组成见表 1. 细骨料为普通河砂, 细度模数为 2.7, II 区级配合格. 粗骨料为 5~20 mm 连续级配石灰石碎石. 拌合水采用洁净自来水. 减水剂为西卡高效减水剂, 减水率 $\geq 25\%$. 混凝土试验配合比见表 2, 减水剂掺量以同坍落度为标准进行调整.

表 1 普通水泥、偏高岭土的化学组成

材料	质量分数/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
普通水泥	24.5	4.5	3.5	55.2	4.0	2.0	2.2
偏高岭土	64.8	29.1	1.0	0.3	1.6	0.2	-

表 2 混凝土试验配合比

编号	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	偏高岭土/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶 比	砂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	石/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	减水 剂/%
MK0	460	—	0.35	630	1 170	1.0
MK5	437	23	0.35	630	1 170	1.0
MK10	414	46	0.35	630	1 170	1.0
MK15	391	69	0.35	630	1 170	1.0
MK20	368	92	0.35	630	1 170	1.0
W1	391	69	0.30	650	1 210	1.5
W2	391	69	0.35	630	1 170	1.0
W3	391	69	0.40	610	1 135	-
W4	391	69	0.45	590	1 095	-

注: 减水剂掺量为胶凝材料的百分比.

1.2 试验方法

1.2.1 试件制作与养护

混凝土由 0.06 m^3 强制式搅拌机拌合, 搅拌时间为 3 min, 试件在振动台上密实成型. 抗压强度试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 立方体, 显微硬度测试试件为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 立方体, 抗氯离子渗透试件直径为 100 mm, 高 50 mm 的圆柱体. 试件成型后立即全部放入标准养护室内, 然后分成两批: 一批在标准养护 4 h 后进行带模蒸汽养护, 因蒸汽养护条件对胶凝材料水化和混凝土性能的影响比较复杂, 为便于比较, 本试验所有蒸养试件均采用如图 1 所示的蒸汽养护制度; 另一批作为标养试件继续标养至测试龄期, 蒸养试件在蒸养结束后脱模, 标养试件在 24 h 后脱模, 试件脱模后统一进行标准养护直至测试龄期.

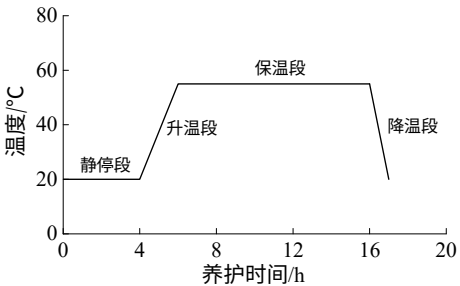


图 1 铁路预应力混凝土轨枕的蒸汽养护制度

抗硫酸盐侵蚀试件尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$, 成型后全部进行蒸汽养护, 蒸养结束后脱模, 继续标准养护至 28 d 龄期, 分成两批: 一批放入清水中养护至测试龄期; 另一批先在温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘 2 h, 冷却至室温后, 放入 10% 硫酸钠溶液中进行半浸泡试验. 半浸泡高度为 $(20\pm 2)\text{ mm}$, 环境温度为 $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $(60\pm 5)\%$, 测试龄期为开始浸泡后第 30、60、90、120、150、210、270 天^[16].

1.2.2 力学性能测试

试件养护至测试龄期时, 采用万能压力试验机进行抗压强度测试, 根据《混凝土强度检验评定标准》(GB50107-2010)规定进行评定.

1.2.3 抗氯离子渗透性测试

试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082-2009)中的快速氯离子迁移系数法(简称 RCM 法)进行测试. 混凝土氯离子扩散系数评价标准见表 3.

表 3 RCM 法评价混凝土渗透性标准^[13]

氯离子扩散系数 $D/$ ($\times 10^{-12}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	抗氯离子 渗透性
$D<2$	非常好
$2\leq D<8$	较好
$8\leq D<16$	一般
$16\leq D$	不适用于严酷环境

1.2.4 抗硫酸盐侵蚀测试

参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T17671-1999)对各龄期试件进行抗折、抗压测试, 然后利用式(1)计算抗压和抗折抗蚀系数, 通过抗蚀系数对蒸养混凝土试件的抗腐蚀能力进行定量分析^[16-17].

$$K_{cn}=P_m/P_{bn}\times 100\%, \tag{1}$$

其中: K_{cn} 为混凝土抗蚀系数, %; P_m 为 10%Na₂SO₄

溶液半浸泡第 n 天试件的抗压或抗折强度, MPa; P_{bn} 为对应同浸泡龄期标准养护混凝土试件抗压或抗折强度, MPa.

1.2.5 显微硬度测试

采用单个粗骨料在 20 mm 立方体试模中成型, 养护至测试龄期, 沿浇注方向切割使骨料外露, 用冷镶嵌软膜和环氧树脂制样, 并将表面打磨、抛光得到试件, 如图 2(a)所示. 以骨料和水泥浆的界面作一条法线, 取法线与界面的交接点作为起始点, 以 $10\ \mu\text{m}$ 为间隔, 在法线两侧等距离交互取 15 个点, 采用图 2(b)方法对试件进行测量^[18], 各测点的显微硬度均取 10 次测定的平均值. 显微硬度测试仪器为 HMAS-D1000 型.

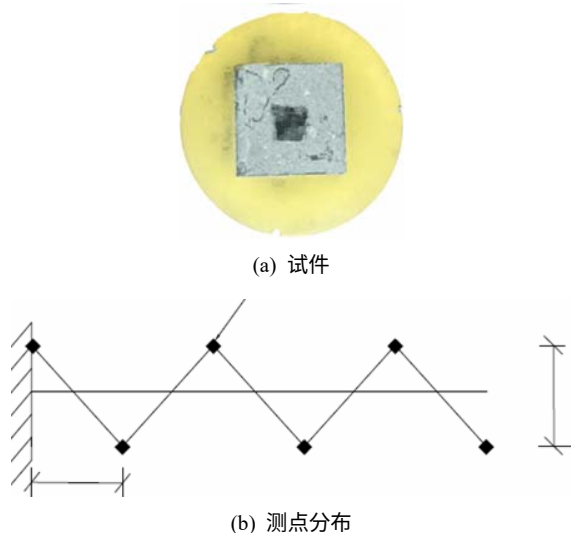


图 2 显微硬度试件及测点分布

1.2.6 热分析

将混凝土试件破碎, 选取不与空气接触的水泥石, 将其浸泡在无水乙醇中终止水化. 实验前 1 d 取出制样, 烘箱 $60\ ^\circ\text{C}$ 干燥, 将水泥石研磨成粉末, 过 $80\ \mu\text{m}$ 筛后, 进行热重分析测试.

2 结果及讨论

2.1 偏高岭土对蒸养混凝土抗压强度的影响

不同掺量偏高岭土蒸养混凝土的抗压强度如图 3 所示. 由图 3 可知, 掺偏高岭土蒸养混凝土各龄期抗压强度均明显高于 MK0, 且脱模强度提高约 7~10 MPa, 这对于蒸养混凝土预制构件生产十分有利. 图 4 为蒸养和标养混凝土后期抗压强度对比, 可发现当偏高岭土掺量低于 15% 时, 蒸养混凝土

强度低于标养, 这主要因为蒸养温度加速了水化反应速率, 水化产物在未完全水化颗粒周围形成屏蔽膜, 水化不均匀, 阻碍胶凝材料进一步的水化, 影响了蒸养混凝土强度发展. 当偏高岭土掺量为 15% 和 20% 时, 蒸养混凝土抗压强度接近或高于标养混凝土, 表明掺入偏高岭土能够改善蒸养引起的混凝土热损伤.

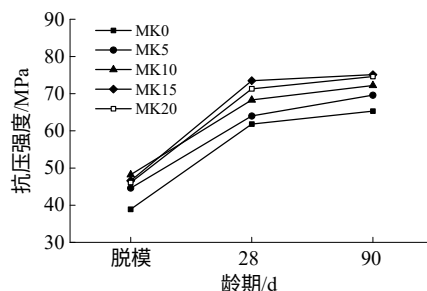


图 3 蒸养混凝土抗压强度随龄期的变化

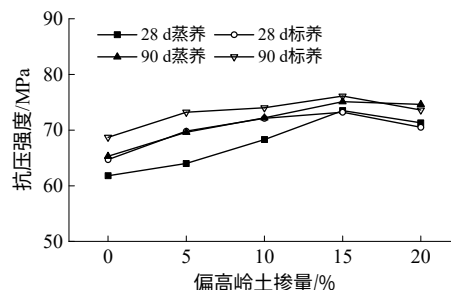


图 4 蒸养与标养混凝土抗压强度对比

固定偏高岭土掺量 15%, 对不同水胶比混凝土抗压强度进行了研究, 结果如图 5 和图 6 所示. 由图 5 和图 6 知, 水胶比越低, 蒸养混凝土抗压强度越高, 说明掺偏高岭土混凝土与普通水泥混凝土的水胶比—强度规律一致. 对比图 5 和图 6 可知, 在水胶比为 0.30 和 0.35 时, 蒸养和标养混凝土的强度接近; 水胶比在 0.40 以上时, 蒸养混凝土强度低于标养混凝土. 表明低水胶比更有利于蒸养, 较高水胶比的混凝土在蒸养时易受热效应损伤.

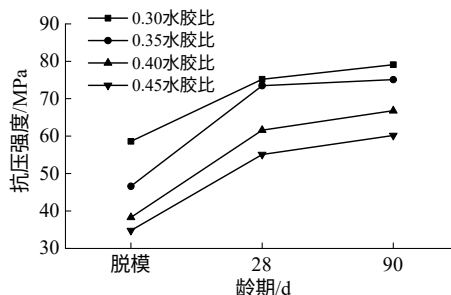


图 5 不同水胶比蒸养混凝土抗压强度

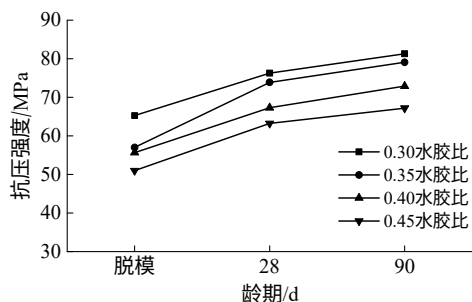


图6 不同水胶比标养混凝土抗压强度

2.2 偏高岭土对蒸养混凝土抗渗性的影响

图7为不同掺量偏高岭土对蒸养混凝土氯离子扩散系数的影响规律。由图7可知,空白混凝土的氯离子扩散系数最高,其脱模龄期的氯离子扩散系数达 $22.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合表3可知,这种混凝土不能用于严酷环境;掺偏高岭土有效降低了混凝土氯离子扩散系数,且随偏高岭土掺量增大,各龄期氯离子扩散系数均呈现降低趋势;当混凝土中偏高岭土掺量为15%和20%时,两者氯离子扩散系数非常接近。

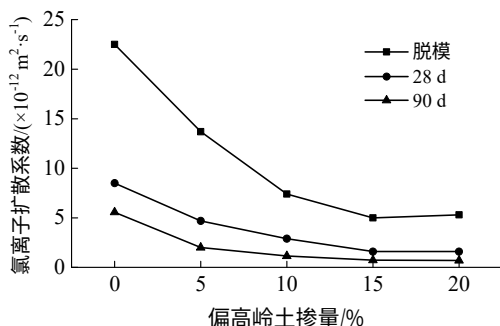


图7 蒸养混凝土氯离子扩散系数的变化

图8为不同掺量偏高岭土混凝土在蒸养与标养条件下氯离子扩散系数的对比。由图8可知,空白组蒸养混凝土28、90d氯离子扩散系数均显著高于空白标养混凝土,而掺偏高岭土后,蒸养混凝土与标养混凝土的扩散系数非常接近,表明蒸养条件对空白混凝土结构造成了一定程度的损伤,掺偏高岭土可减轻这种蒸养损伤,提高混凝土密实度,改善蒸养混凝土抗渗性。

图9对比了不同水胶比对掺15%偏高岭土蒸养混凝土氯离子扩散系数的影响。由图9可知,水胶比越低,氯离子扩散系数越低。对于蒸养混凝土而言,水胶比是影响其质量的重要因素。通常较低水灰比的混凝土早期强度发展快,结构形成迅速,

有利于抵抗蒸养热效应产生的水汽膨胀作用,更适合蒸养。结合表3可知,脱模龄期除了0.45水胶比氯离子扩散系数评价等级为一般外,其余各组均较好,说明蒸养混凝土的水胶比不宜超过0.40。

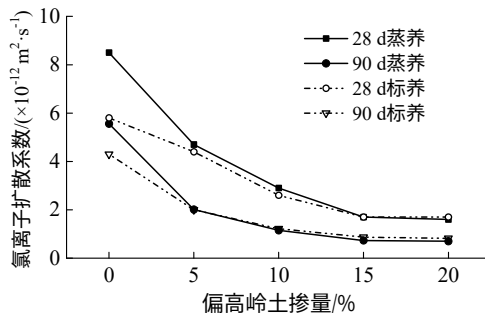


图8 蒸养与标养混凝土氯离子扩散系数对比

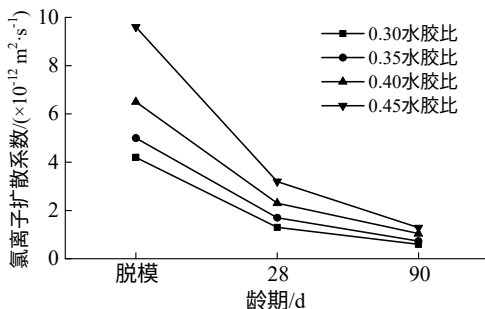


图9 不同水胶比蒸养混凝土的氯离子扩散系数

图10为不同掺量偏高岭土混凝土28、90d抗压强度和氯离子扩散系数的变化,分析可得蒸养和标养混凝土抗压强度和氯离子扩散系数的相关性。由图10可知,无论蒸养还是标养,抗压强度越高,氯离子扩散系数越低,抗渗性越好;蒸养、标养混凝土抗压强度和氯离子扩散系数的相关系数分别达0.96和0.86,表明抗压强度与氯离子扩散系数相关性较好,且蒸养条件下相关性更好。

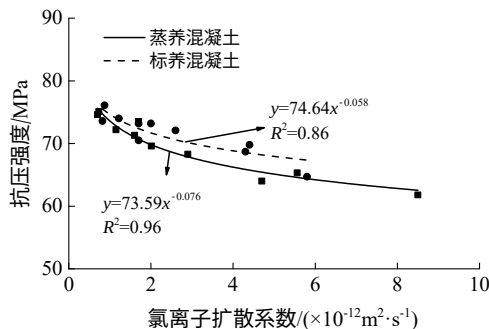


图10 混凝土抗压强度和氯离子扩散系数的相关性

2.3 偏高岭土对蒸养混凝土抗硫酸盐侵蚀的影响

图11为偏高岭土掺量对蒸养混凝土抗硫酸盐

侵蚀性能的时变规律. 由图 11(a)可知, 随半浸泡时间增加, 蒸养混凝土抗压抗蚀系数出现先升后逐渐下降的变化规律, 210 d 和 270 d 时掺偏高岭土抗压抗蚀系数高于空白组, MK15 时抗硫酸盐侵蚀效果显著. 在图 11(b)中, 蒸养混凝土抗折抗蚀系数在本试验半浸泡龄期内, 空白组的抗蚀系数是先缓慢上升后明显下降, 而掺偏高岭土组抗折抗蚀系数并未出现明显的下降, 且 MK15、MK20 的抗折抗蚀系数始终大于 1. 从硫酸盐浸泡后试件的抗压和抗折抗蚀系数变化看, 掺偏高岭土有利于提高蒸养混凝土抵抗硫酸盐侵蚀能力. 据文献[17,19]分析, 这主要是因为掺矿物掺合料产生了稀释效应, 增大了有效水灰比, 促进了水泥水化; 同时矿物掺合料的火山灰效应和微集料效应也协同作用, 减少了有害孔, 使混凝土更为密实, 盐溶液难以进入混凝土内部, 从而有效抑制了硫酸盐的侵蚀破坏.

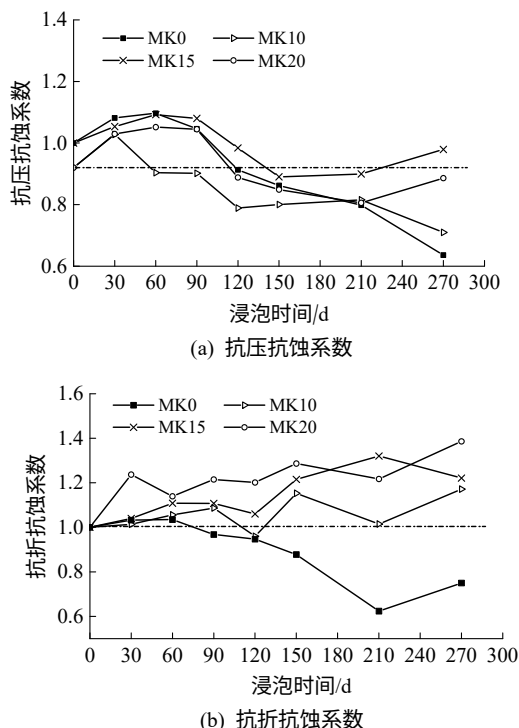


图 11 偏高岭土掺量对混凝土抗蚀系数的影响

2.4 偏高岭土对蒸养混凝土显微硬度的影响

图 12 为蒸养混凝土界面区显微硬度 90 d 龄期的测试结果. 对比空白组, 同 0.35 水胶比条件下, 掺 15%偏高岭土的 W2 组在距骨料表面 10、20、30 μm 界面区显微硬度值分别提高约 55%、51%和

22%, 且界面区宽度有所减小, 表明掺适量偏高岭土可提高界面区强度, 增强骨料和水泥基体的黏结, 强化界面区结构.

图 13 为不同水胶比时掺 15%偏高岭土对蒸养混凝土界面区显微硬度的影响. 由图 13 可知, 随着水胶比的增大, 界面过渡区显微硬度值逐渐减小. 对比 W1、W2、W3 和 W4 组, 水胶比为 0.30 和 0.35 的蒸养混凝土界面过渡区宽度为 50~60 μm , 而水胶比为 0.40 和 0.45 的试件界面区宽度为 60~80 μm , 表明低水胶比更有利于偏高岭土火山灰活性的发挥, 可减小界面区宽度.

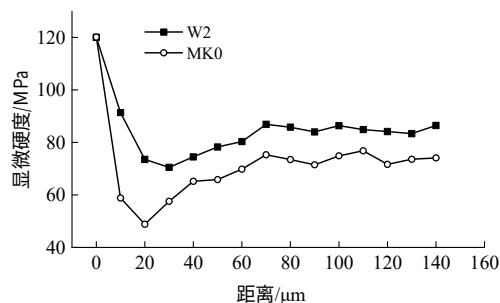


图 12 掺偏高岭土对显微硬度的影响

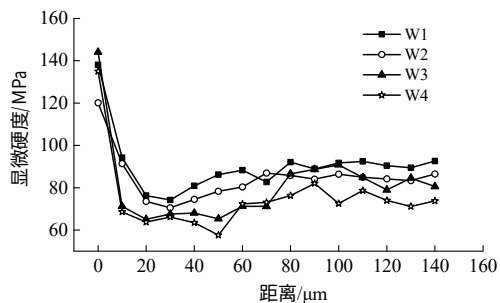


图 13 水胶比对掺偏高岭土混凝土显微硬度的影响

2.5 偏高岭土对蒸养混凝土水化的影响

图 14 为不同偏高岭土掺量蒸养混凝土 28 d 热分析结果, 对于水泥混凝土材料, 差热曲线通常会出现 3 个吸热峰, 其中对应 28~200 $^{\circ}\text{C}$ 的吸热峰主要是水泥水化产物层间水、C-S-H 凝胶及 AFt 脱水形成; 400~450 $^{\circ}\text{C}$ 的吸热峰是由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解引起; 650~720 $^{\circ}\text{C}$ 的吸热峰是因为 CaCO_3 的分解以及 C-S-H 凝胶的脱水引起. 由图 14(a)可知, MK0 对应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解引起的吸热峰最显著, 说明空白组水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量最高.

从图 14(b)热重分析数据可得到, 在 400~450 $^{\circ}\text{C}$ 温度区间内, MK0、MK5、MK10、MK15 和 MK20 质量损失分别为 2.17%、1.63%、1.47%、1.10%、

0.74%。在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解过程中, 1 份质量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解产生 0.243 份质量的 H_2O 和 0.757 份质量的 CaO , 因此各质量损失对应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量分别为 8.93%、6.71%、6.04%、4.53%、3.04%, 空白组最高, 掺偏高岭土组的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量随偏高土掺量增加而逐渐减少, 这归因于偏高岭土中活化分子 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 产生的二次水化反应, 消耗了大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 生成了 C-S-H 凝胶等产物。二次水化产物优化了孔结构, 使结构更加致密, 从而提高了混凝土抵抗氯离子、硫酸根离子的渗透作用^[15,19], 同时也提高了抗压强度, 这与文中前述试验结果互为印证。

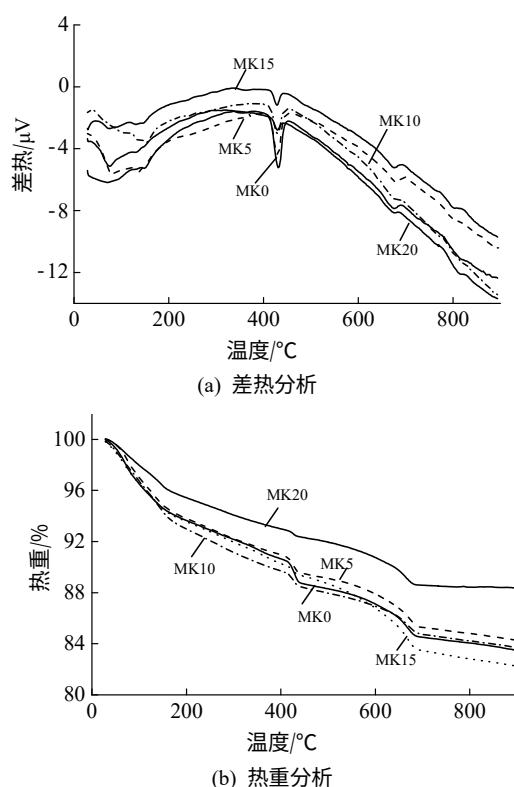


图 14 不同偏高岭土掺量蒸养混凝土热分析曲线

图 15 是对不同水胶比(0.30~0.45)掺 15%偏高岭土混凝土的热分析曲线。由图 15(b)可知, 在 400~450 °C 范围内, W1、W2、W3 和 W4 的质量损失分别为 0.83%、1.09%、1.14%、1.1%, 对应试件 W1、W2、W3、W4 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量分别为 3.40%、4.47%、4.68%、4.53%。随着水胶比增大, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量呈增大趋势, 当水胶比为 0.30 时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量最低, 表明蒸养条件下, 低水胶比有助于偏高岭土活性的激发, 消耗了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。

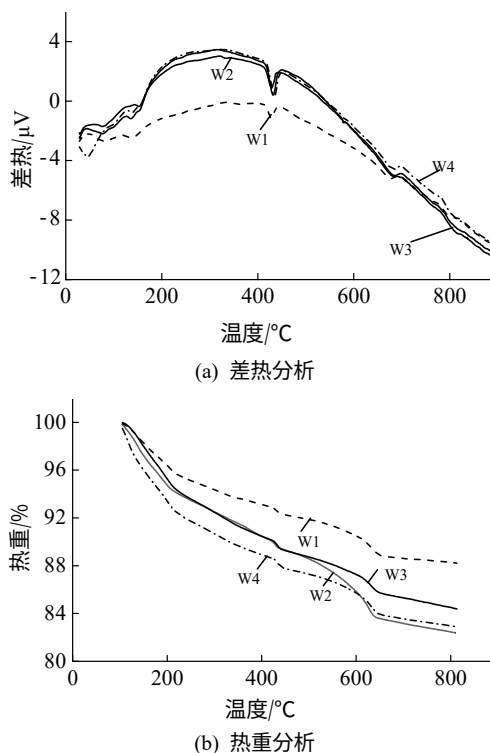


图 15 不同水胶比蒸养混凝土热分析曲线

3 结论

(1)掺偏高岭土有效提高了蒸养混凝土的抗压强度, 尤其是脱模强度; 降低了蒸养混凝土的氯离子扩散系数, 偏高岭土掺量为 15%时的抗压强度和抗渗性最佳; 掺偏高岭土蒸养混凝土抗压强度与其抗氯离子渗透性显著相关。

(2)掺偏高岭土改善了蒸养混凝土抗硫酸盐侵蚀性能, 抗折抗蚀系数大幅提高, 偏高岭土掺量为 15%~20%时效果较为明显。

(3)掺适量偏高岭土可提高界面区显微硬度, 增强骨料和水泥基体的黏结, 强化界面区结构; 低水胶比更有利于偏高岭土火山灰活性的发挥, 可减小界面区宽度。

(4)偏高岭土与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的二次水化, 生成了更多的水化产物; 当水胶比为 0.3 时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量最低, 这表明蒸养条件下, 低水胶比有助于加速其二次水化, 消耗了更多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。

参考文献:

- [1] 贺智敏. 蒸养混凝土的表层伤损效应[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6):994-1001.
- [2] 吴建华, 刘云兰, 邓少桢. 蒸养混凝土早期强度影响因素

- 素研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2010, 23(4):112-116.
- [3] 莫宗云, 高小建. 偏高岭土改性混凝土的耐久性研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(8):115-119.
- [4] 钱晓倩, 詹树林, 李宗津. 掺偏高岭土的高性能混凝土物理力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(1):75-78.
- [5] 卢都友, 张少华, 徐江涛. 石灰石微粉与偏高岭土复合对水泥强度和水化产物的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5):663-667.
- [6] 乔春雨, 倪文, 王长龙. 较大偏高岭土掺量下偏高岭土-水泥硬化浆体性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3):393-399.
- [7] 蒋林华. 赛高岭混凝土研究[J]. 硅酸盐通报, 2001, 20(5):51-54.
- [8] 曾俊杰, 王胜年, 范志宏, 等. 偏高岭土改善海工混凝土抗氯离子侵蚀性的效果及机理[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(4):22-28.
- [9] Gruber K A, Ramlochan T, Boddy A, et al. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin[J]. Cement and Concrete Compute, 2001, 23(6):479-484.
- [10] Boddy A, Hooton R D, Gruber K A. Long term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(5):759-765.
- [11] Lee S T, Moon H Y, Hooton R D, et al. Effect of solution concentrations and replacement levels of metakaolin on the resistance of mortars exposed to magnesium sulfate solutions[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(7):1314-1323.
- [12] Ali M A, Gozde I S, Kambiz R. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70(11):17-25.
- [13] 曾俊杰, 水中和, 王胜年. 掺偏高岭土和矿粉蒸养高强砂浆早期水化特征和孔结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8):2857-2863.
- [14] Cassagnabère F, Escadeillas G, Mouret M. Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2):775-784.
- [15] 徐雯雯, 贺智敏, 柳俊哲, 等. 偏高岭土对蒸养混凝土强度和毛细吸水性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1):20-26.
- [16] 冷发光, 马孝轩, 田冠飞. 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(11):45-48.
- [17] 马林昆, 谢友均, 龙广成. 水泥基材料在硫酸盐结晶侵蚀下的劣化行为[J]. 中南大学学报, 2010, 41(1):302-308.
- [18] 陈伟, 田亚坡, 周紫晨. 粉煤灰混凝土抗碳化性能及显微硬度分析[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(11):48-51.
- [19] 李华, 孙伟. 矿物掺合料改善水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性能的微观分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8):1119-1126.

Effect of metakaolin on the performance of steam cured concrete

SHEN Huang-bing¹, HE Zhi-min^{1*}, HE Jian-ming²

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Guangtian Co. Ltd., Ningbo 315212, China)

Abstract: In order to improve the performance of steam curing concrete, the effect of metakaolin (MK) on steam cured concrete compressive strength, resistance to chloride ion permeability and sulfate corrosion were investigated. Through thermal analysis and interface microhardness test, the mechanism of MK on steam cured concrete was also discussed. Results show that MK can significantly improve the steam cured concrete demoulding strength and resistance to chloride ion permeability, and the optimal incorporating amount of MK is 15 percent. MK enhances the sulfate resistance of steam cured concrete, and its flexural resistance coefficient is much higher than that of the blank concrete. The improvement mechanism of MK on the performance of steam cured concrete is related to its consumption of a large amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which increases the interface area micro hardness and strengthen the interface.

Key words: steam curing; metakaolin; chloride; sulfate; micro hardness; hydration

(责任编辑 史小丽)