

不同水灰比条件下碳酸钙晶须对水泥净浆收缩性能的影响

郑忠良¹, 尤博¹, 张兆彪¹, 李宇翔², 曹明莉²

(1. 中国二十二冶集团有限公司, 河北 唐山 064000; 2. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为探究碳酸钙晶须对水泥净浆收缩性能的影响,分别测试了3种水灰比试样在不同龄期的干燥收缩、化学收缩和自收缩,并采用X射线衍射(XRD)和压汞法(MIP)分别分析了自收缩试样的物相和孔隙结构变化特性。结果表明:碳酸钙晶须在水泥基体中具有吸附和转移自由水的特性;在不同水灰比条件下,碳酸钙晶须对干燥收缩的影响不同,且影响程度与其掺量呈正相关关系;化学收缩随碳酸钙晶须掺量呈先升后降的变化趋势;碳酸钙晶须对自收缩具有明显的改善作用,尤其是早期自收缩,且水灰比的提高使碳酸钙晶须对早期自收缩的改善效果更加显著;碳酸钙晶须细化了孔隙结构,且未生成新的水化产物。

关键词:水泥净浆;碳酸钙晶须;水灰比;干燥收缩;化学收缩;自收缩

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)01-0066-07

Influence of calcium carbonate whiskers on shrinkage performance of cement paste with different water cement ratios//ZHENG Zhongliang¹, YOU Bo¹, ZHANG Zhaobiao¹, LI Yuxiang², CAO Mingli² (1. China Mcc22 Group Corporation Ltd., Tangshan 064000, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To investigate the effect of calcium carbonate whiskers on the shrinkage properties of cement paste, dry shrinkage, chemical shrinkage and autogenous shrinkage of specimens with three kinds of water cement ratios were tested at different ages, respectively. The phase composition and pore structure changes of the autogenous shrinkage specimens were characterized using X-ray diffraction (XRD) and mercury intrusion porosimetry (MIP), respectively. The results show that calcium carbonate whiskers have the characteristics of adsorbing and transferring free water in cementitious materials. Under different water cement ratios, calcium carbonate whiskers exhibit different effects on drying shrinkage, and the degree of influence shows a trend of initially increasing and then decreasing with the dosage of calcium carbonate whiskers. The chemical shrinkage shows a tendency of increasing and then decreasing with its dosage. Calcium carbonate whiskers can significantly improve the self-shrinkage, especially the early autogenous shrinkage, and the increase of the water cement ratio makes the improvement of the early autogenous shrinkage by calcium carbonate whiskers more significant. The whiskers refine the pore structure without generating new hydration products.

Key words: cement paste; calcium carbonate whiskers; water cement ratio; dry shrinkage; chemical shrinkage; autogenous shrinkage

目前,对水泥净浆的收缩开裂调控手段主要有外加剂调控、胶凝材料调控、水胶比调控、收缩补偿调控、骨料调控、微纳碳纤维调控等^[1-6],而外加剂调控对抑制水泥净浆收缩开裂具有显著的优越性。例如减缩剂可以降低水泥和辅助胶凝材料颗粒表面张力,保持其内部结构相对湿度^[7-8];膨胀剂能很好地抑制自收缩、抵抗干燥干缩,但对后期收缩约束作用较小^[9-10]。但水泥净浆抗拉强度低,收缩产生的应

力会导致材料内部和表面产生裂缝,降低结构耐久性和抗渗性等,从而影响结构外观,降低使用寿命,甚至会导致结构劣化、承载力降低从而严重威胁建筑安全^[11]。

普通混凝土由于抗拉强度低,抗裂性能差等局限性已逐渐不能满足新的建筑要求;高强混凝土因高水胶比、高外加剂掺量的特点也使得其收缩变形加大,从而导致混凝土结构出现早期体积不稳定等

问题^[12-13]。随着技术的发展,性能更加优秀的纤维增强水泥净浆被提出并不断发展^[14-15],其中碳酸钙晶须作为一种微米级纤维材料,对水泥净浆的韧性以及耐久性等方面具有显著的增强效果^[16-18],但碳酸钙晶须对水泥净浆收缩性能的影响还缺乏研究。

本文在测试水泥浆体中自由水含量随时间变化情况的基础上,分析了碳酸钙晶须自身特性及不同水灰比、不同掺量的碳酸钙晶须水泥净浆的干燥收缩、化学收缩和自收缩特性,并采用 X 射线衍射 (XRD) 物相分析和压汞法 (MIP) 孔结构分析探究碳酸钙晶须对水泥净浆收缩性能的影响机理,以期 of 碳酸钙晶须的实际工程应用提供参考。

1 试验方法

1.1 原材料

试验使用的原材料包括 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥(密度 3.10 g/cm²,比表面积 346.4 m²/kg)和碳酸钙晶须(长 20~30 μm,直径 0.5~2 μm,比表面积约 7.0 m²/g,抗拉强度和弹性模量分别为 3~6 GPa和 410~710 GPa)和水,其中碳酸钙晶须分散性良好,试验用水采用本地自来水。所有原材料在试验前均在室温状态下保存 24 h 以上,以减小因温度变化造成的试验误差。图 1 为碳酸钙晶须宏观和微观形貌。

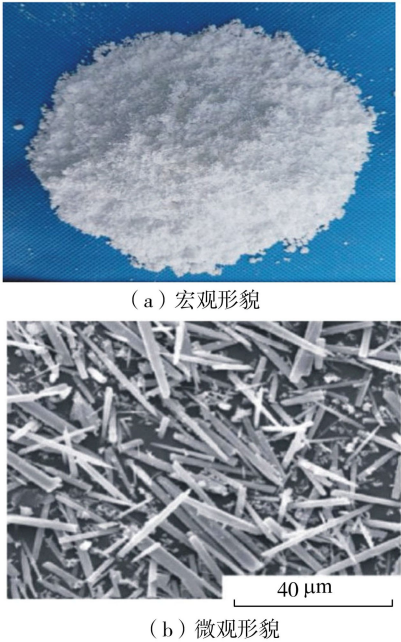


图 1 碳酸钙晶须宏观和微观形貌

1.2 配合比

考虑水灰比和碳酸钙晶须掺量两个因素对水泥净浆收缩性能的影响,干燥收缩试验碳酸钙晶须掺量(体积比)采用 0(对照组)、1%、2%、3% 和 4%,水灰比采用 0.30、0.35 和 0.40,具体配合比如表 1

所示。水泥净浆自由水含量试验浆体配合比如表 2 所示,采用 1% 和 3% 两种碳酸钙晶须掺量,水灰比均采用 0.50。

表 1 干燥收缩试验配合比

试样编号	水灰比	水泥/g	自来水/g	碳酸钙晶须/g	碳酸钙晶须掺量/%
W30-0	0.30	1 000	300	0	0
W30-1	0.30	970	291	17.2	1
W30-2	0.30	960	288	34.3	2
W30-3	0.30	950	285	51.4	3
W30-4	0.30	940	282	68.6	4
W35-0	0.35	1 000	350	0	0
W35-1	0.35	897	314	17.2	1
W35-2	0.35	888	311	34.3	2
W35-3	0.35	879	308	51.5	3
W35-4	0.35	870	304	68.6	4
W40-0	0.40	1 000	400	0	0
W40-1	0.40	834	334	17.2	1
W40-2	0.40	826	331	34.3	2
W40-3	0.40	817	327	51.5	3
W40-4	0.40	809	324	68.6	4

表 2 水泥净浆自由水含量试验浆体配合比

试样编号	水灰比	水泥/g	自来水/g	碳酸钙晶须/g	碳酸钙晶须掺量/%
CW-0	0.5	1 500	750	0	0
CW-1	0.5	1 500	750	35.5	1
CW-3	0.5	1 500	750	107.5	3

1.3 试验方法

参考文献[19]中的试验方法进行水泥净浆自由水含量试验。水泥搅拌时用密封袋密封搅拌锅,以确保试验中除取样操作外,浆体与外部环境分隔,减少水分蒸发的影响;试验过程中持续搅拌,保持浆体流动性。在加水并搅拌完成后 20、40、60、90、120、150 min 时分别取一定量的水泥净浆装入 10 mL 容量的离心管内,每组设置 2 个平行试样,测试结果取其平均值。使用 AXTG16G 台式高速离心机(最大速度为 16 600 r/min)以 6 000 r/min 的转速离心 10 min 从浆体中分离出游离水,离心后收集上清液并称重,采用下式计算游离水含量:

$$f_w = [m_2(m_w + m_b)/m_1m_w] \times 100\%$$
 (1)

式中: f_w 为游离水含量; m_1 为离心管内浆体的质量; m_2 为离心后上清液的质量; m_w 为试验用水的总质量; m_b 为试验中水泥和碳酸钙晶须的总质量。

干燥收缩试验参照 JC/T 603—2004《水泥胶砂干缩试验方法》进行。干燥收缩试验每组配比设置 3 个平行试样,最终结果取其平均值。

早期自收缩试验参照 ASTM C1698《水泥净浆和砂浆自收缩的标准测试方法》进行,利用波纹管试验测量碳酸钙晶须水泥净浆的早期自收缩,测量持续 24 h,每 1 h 采集 1 次千分表读数,每组配比设置

3 个平行试样,试样的自收缩按下式计算:

ε_a = (R₀ - R_t)/L₀ (2)

式中:ε_a为自收缩;R_t为 t 时刻的千分表读数;L₀、R₀ 分别为试验开始时的试样长度和千分表读数。

长期自收缩试验试样尺寸与干燥收缩试验一致,成型 24 h 后拆模并用铝箔锡纸密封包裹,置于温度 (20±2)℃ 环境下养护 7、14、28、56、90、180 d 并测量试样长度,长期自收缩也按式(1)计算。

化学收缩试验参照 ASTM C1608—17《水泥浆体化学收缩标准测试方法》进行。称量玻璃瓶及水泥浆质量,玻璃瓶注满水后塞入带孔橡胶塞并将刻度管插入橡胶塞中,然后将装置放入恒温水箱中进行养护,放入 1 h 后读取初始数据,7 d 内每 24 h 读取 1 次数据,每组配比设置 3 个平行试样。

2 结果与分析

2.1 自由水含量

各时间节点和不同配合比自由水含量试验结果如图 2 所示。可以看出,掺入碳酸钙晶须后各时间节点净浆的自由水含量较对照组 (CW-0) 均有显著减小,且随着碳酸钙晶须掺量的提高,其降幅也进一步加大,与 CW-0 试样相比,0 min 时 CW-1 和 CW-3 试样的自由水含量分别降低了 15.39% 和 38.47%。碳酸钙晶须的主要成分为 CaCO₃,其可以稳定存在于水泥基体中,不参与水泥水化反应,而自由水含量随着碳酸钙晶须掺量的提高而降低,说明水泥浆体内游离的自由水会附着在碳酸钙晶须的表面,使得基体的自由水含量降低。另外,CW-0 试样水泥净浆内的自由水含量随时间逐渐降低,这是因为自由水参与水泥水化反应被消耗,因此未被离心出来,而在加入碳酸钙晶须后,整体的自由水含量下降,但在部分时间节点则出现了升高现象:在 1% 的碳酸钙晶须掺量下,20 min 时自由水含量较 0 min 提高了 4.56%,20 min 后随时间逐渐下降;在 3% 的掺量下,在 0~90 min 内自由水含量持续升高,90 min 时自由水含量较 0 min 提高了 14.50%,自由水含量升高的现象说明附着在碳酸钙晶须上的自由水转移到了水

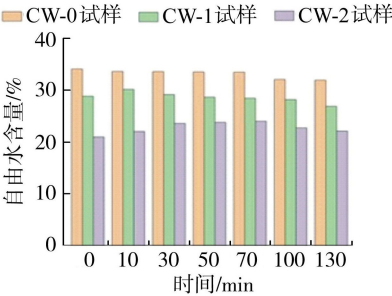


图 2 不同时间节点自由水含量变化

泥基体中,而这一驱动力可能是来自内部相对湿度降低产生的湿度梯度,随着碳酸钙晶须掺量的提高,自由水的转移过程会持续更长的时间,由于碳酸钙晶须的主要成分为 CaCO₃,组成十分稳定^[20],不会在水泥水化过程中发生反应,因此推测水分转移过程在整个水化过程中都在持续发生。

2.2 干燥收缩

干燥收缩试验结果如图 3 所示,可以看出干燥收缩在 28 d 前发展较为迅速,28 d 后速率逐渐下降,90 d 后干燥收缩发展几乎停止。当水灰比为 0.30 时,与 W30-0 试样相比,碳酸钙晶须掺量为 1%、2%、3%、4% 试样的 180 d 干燥收缩值分别提高了 2.10%、2.40%、2.54% 和 3.67%。微米级的碳酸钙晶须填充到基体内部细化了孔隙结构^[14],根据毛细管张力理论^[21],此时毛细管张力增大从而促进了干燥收缩的发展。而当水灰比为 0.35 时,W35-1~W35-4 试样的 180 d 干燥收缩值较 W35-0 试样分别降低了 1.64%、3.20%、6.04% 和 6.44%,水灰比为 0.40 时 W40-1~W40-4 试样的 180 d 干燥收缩值较 W40-0 试样分别降低 0.41%、2.02%、5.18% 和 7.59%。说明增大水灰比,碳酸钙晶须对干燥收缩降低效果更加显著。增大水灰比后,碳酸钙晶须通过吸收自由水含量和降低毛细管张力的作用,使得

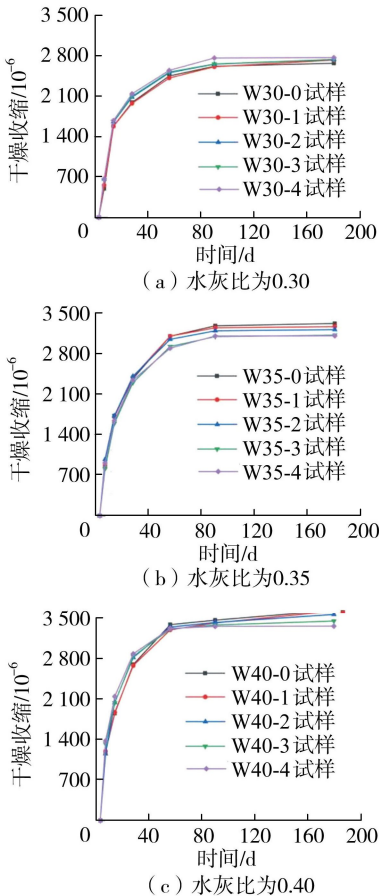


图 3 干燥收缩试验结果

干燥收缩降低效果更为显著。在 0.40 水灰比下, W40-2 ~ W40-4 试样的早期干燥收缩发展速度较快,这可能是因为较高的水灰比下,碳酸钙晶须在吸附水分后基体内部的自由水含量仍保持在一个较高的水平,而且由于碳酸钙晶须细化孔隙结构的作用依旧存在,导致早期干燥收缩发展明显更快。从试验结果看,提高水灰比使得水泥净浆的干燥收缩值也随之提高,但在 0.35 水灰比下碳酸钙晶须可以有效降低水泥净浆的干燥收缩值。

2.3 化学收缩

图 4 为不同水灰比水泥净浆的 7 d 化学收缩变化。可以观察到,在同一水灰比下,随着碳酸钙晶须掺量的提高,7 d 龄期时水泥净浆的化学收缩先升高后降低。其中 1% 碳酸钙晶须掺量的化学收缩最大,4% 掺量的收缩最小,并且随着水灰比的增大,碳酸钙晶须对化学收缩的影响效果略有降低,低掺量(1%)时, W30-1、W35-1 和 W40-1 试样与各自水灰比下的对照组相比,化学收缩分别升高了 11.71%、16.48% 和 27.26%;但高掺量的碳酸钙晶须对化学收缩依然有改善效果,其中 4% 碳酸钙晶须掺量改善效果最好, W30-4、W35-4 和 W40-4 试样与各自对照组相比,化学收缩分别降低了 39.20%、21.13% 和 18.01%,可以发现高掺量的碳酸钙晶须在低水灰比下对化学收缩有较为显著的改善效果。

随着水灰比的增大,同一碳酸钙晶须掺量下的

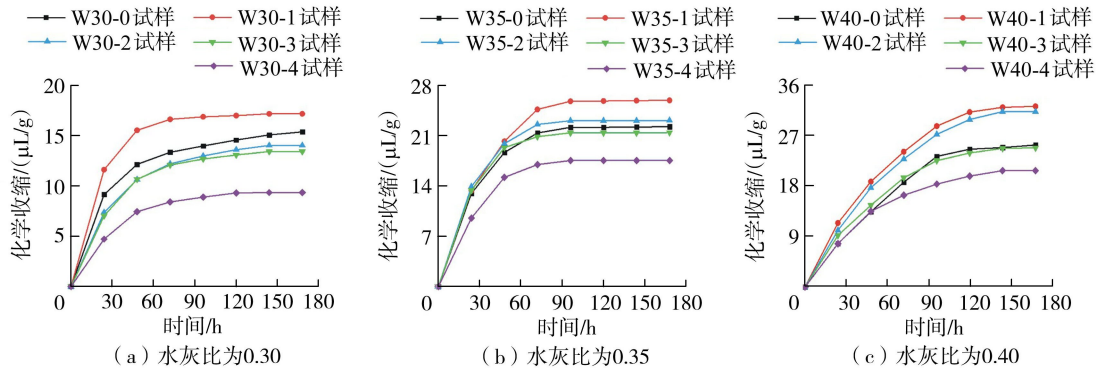


图 4 化学收缩试验结果

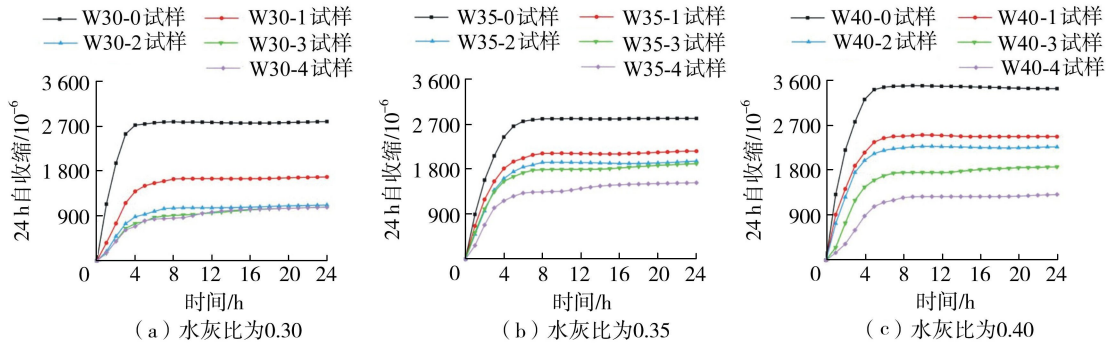


图 5 24 h 自收缩试验结果

水泥净浆化学收缩呈现上升趋势,这是因为水灰比提高后,水泥净浆中自由水含量上升,使得水泥颗粒的水化条件得到优化,各相矿物成分的水化速率提高,从而在早期产生更多的水化产物,并分散于水泥基体中,因而增大了早期化学收缩^[22]。

2.4 自收缩

图 5 为 3 种水灰比下,不同碳酸钙晶须掺量水泥净浆的早期自收缩变化。为更全面分析早期自收缩在不同阶段的特点,根据试验标准测定了部分配合比水泥净浆的初凝时间和终凝时间,测定结果如表 3 所示。

表 3 凝结时间测定结果			单位:min
试样编号	初凝时间	终凝时间	
W30-0	235	320	
W30-2	230	315	
W30-4	215	305	
W35-0	290	350	
W35-2	270	345	
W35-4	255	360	
W40-0	340	385	
W40-2	325	315	
W40-4	310	300	

从图 5 可以看出,净浆自收缩在前 6 h 内发展相对迅速,6 h 后自收缩发展开始放缓,掺入碳酸钙晶须后水泥净浆 24 h 的自收缩值显著降低, W30-1 ~ W30-4 试样的 24 h 自收缩值较 W30-0 试样分别降低了 39.74%、59.90%、61.37% 和 61.53%。由表 3

可知,水灰比为 0.30 的水泥净浆终凝时间基本在 300 min 左右,且随着碳酸钙晶须掺量提高,初凝和终凝时间相较于对照组都有所提前,这使得 W30-1 ~ W30-4 试样较早进入了自干燥收缩阶段,自收缩速率提前降低,同时碳酸钙晶须加入后使得早期化学收缩减小,表现为自收缩发展放缓。当水灰比增大时,碳酸钙晶须掺量的提高有利于减缓自收缩。水灰比为 0.35 时,W35-1 ~ W35-4 试样的 24 h 自收缩值较对照组 W35-0 试样分别降低了 23.23%、30.29%、32.14% 和 45.63%。水灰比为 0.40 时,W40-1 ~ W40-4 试样的 24 h 自收缩值较对照组 W40-0 试样分别降低了 27.99%、33.99%、45.58% 和 61.73%。

根据上述分析,在毛细孔失水过程中产生的机械应力导致较大的自收缩。当掺入碳酸钙晶须后,其较高的长径比不仅会贯穿毛细孔而且会形成三维乱向分布,从而降低这种机械应力,导致收缩值较小。需要注意的是,无论是干燥收缩还是自收缩,只要浆体内部毛细孔产生机械应力,碳酸钙晶须就会对毛细孔的变形产生约束作用。

由图 6 可见,自收缩在早期发展速度较快,前 14 d 的自收缩值占比超过 180 d 收缩的 60%。水灰比为 0.30 时 W30-1 ~ W30-4 试样的 180 d 自收缩值较 W30-0 试样分别降低了 15.3%、21.0%、29.0% 和 43.5%;水灰比为 0.35 时 W35-1 ~ W35-4 试样的 180 d 自收缩值较 W35-0 试样分别降低了 14.9%、23.6%、32.9% 和 42.3%;水灰比为 0.40 时

W40-1 ~ W40-4 试样的 180 d 自收缩值较 W40-0 试样分别降低了 11.67%、24.38%、28.00% 和 29.24%。不同水灰比情况下自收缩发展均随着碳酸钙晶须掺量的升高而显著降低,说明碳酸钙晶须对水泥净浆的长期自收缩有较为显著的抑制作用,这可能有两方面原因:一是当水泥水化消耗自由水引起基体内部相对湿度降低时,碳酸钙晶须会将早期吸附自由水释放到基体中,这部分水分可以补充到即将失水的毛细孔中,从而减小自干燥收缩发展,即发挥内养护作用^[23],减少自收缩的发展;二是针棒状的碳酸钙晶须具有较高的长径比和较大的弹性模量,当试样因收缩出现变形时,碳酸钙晶须可以发挥桥接作用^[24],使得变形被有效限制。

2.5 物相与孔结构分析

对长期自收缩试验的试样进行 XRD 物相分析和 MIP 孔结构分析。对 90 d 龄期的 W30-0、W30-2、W30-4、W35-0、W35-2 和 W35-4 自收缩试验试样取样,利用 XRD 仪进行测试,并通过 MDI Jade 分析软件对 XRD 图谱进行分析,主要分析 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 和文石相 CaCO_3 的特征峰变化,测试结果如图 7 所示;对 28 d 龄期水灰比为 0.35 的 W35-0、W35-1 和 W35-4 自收缩试验试样进行 MIP 测试,分析碳酸钙晶须对水泥净浆基体孔隙率和孔径分布的影响,结果如图 8 所示。

从图 7(a)可以看出,水灰比为 0.30 时,相较于 W30-0 试样,W30-2 和 W30-4 试样除文石相 CaCO_3 峰强有所提高外,并没有出现新的峰值,说明掺入碳

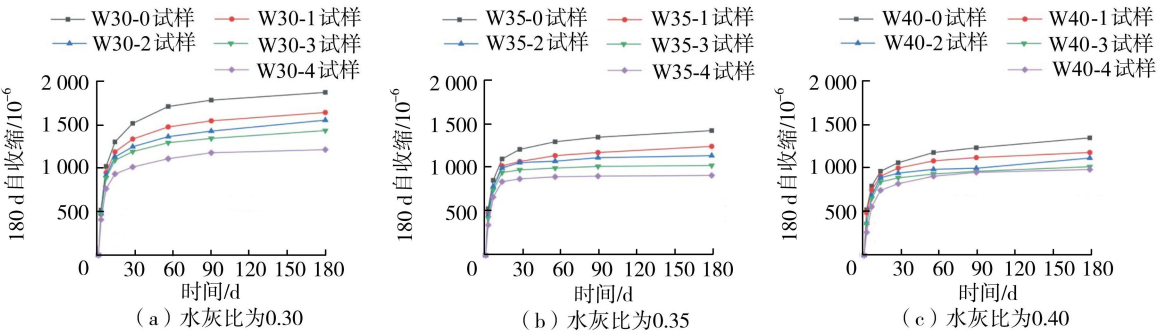


图 6 180 d 自收缩试验结果

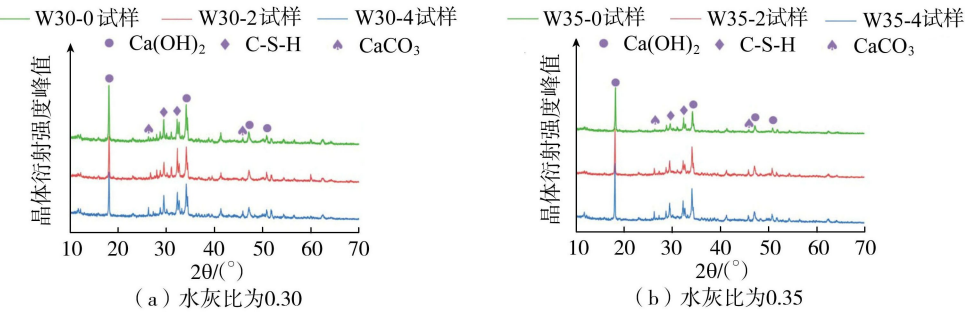


图 7 90 d 龄期自收缩试验试样 XRD 图谱

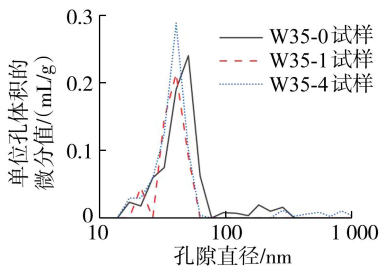


图8 水泥净浆孔结构分布

酸钙晶须并未在基体内生成其他物质。当碳酸钙晶须掺量从2%提高至4%时,代表 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 的峰强与对照组相比有所下降,说明碳酸钙晶须掺量提高后,水泥的水化程度略有降低,这说明在较低的水灰比条件下,碳酸钙晶须会降低水泥水化的程度,进一步说明了碳酸钙晶须会吸附基体内的自由水导致早期水泥水化速率降低。

如图7(b)所示,当水灰比提高到0.35时,与0.30水灰比不同,随着碳酸钙晶须掺量的提高,代表 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 的峰强与对照组 W35-0 试样相比有所升高,说明在水灰比为0.35时,碳酸钙晶须反而会增大水泥水化的程度,这可能是因为水灰比提高后,早期阶段碳酸钙晶须仍会吸附部分自由水,但此时基体内自由水含量提高,水泥水化依然处在较高的反应水平,且在凝结后的自干燥过程中,碳酸钙晶须的内养护作用更加显著,可以加大反应中期的水化程度,使得基体内水化产物含量有所提升。图8表明,W30-0试样的孔径分布相对比较集中,孔径大小基本集中在100 nm以内,孔隙率为16.83%。掺入碳酸钙晶须后,W35-1和W35-4试样的孔径集中在70 nm以内,其孔径的分布比对照组W30-0试样更加集中,且小尺寸的孔径占比更大,孔隙率分别为12.67%和13.29%。掺入碳酸钙晶须后,水泥净浆的孔隙率和平均孔径均有所降低,说明碳酸钙晶须发挥了填充作用,改善了基体的孔隙结构,细化了大孔隙结构。当碳酸钙晶须掺量从1%增大到4%时,孔隙率从12.67%增大到13.29%,这可能是因为随着碳酸钙晶须掺量的提高,导致基体内部的微观结构相对致密。但掺入4%的碳酸钙晶须会导致团聚现象,即碳酸钙晶须之间形成搭接夹角,水泥浆体难以填充,导致W35-4试样相比W35-1试样的孔隙率略高,文献[14,25]也得到相同的结论。

3 结 论

a. 碳酸钙晶须在水泥基体中具有吸附和转移自由水的特性。当基体内部相对湿度下降时,碳酸钙晶须吸附的自由水会逐渐转移到基体中,且在整个水化进程中,自由水的转移会持续存在。

b. 水灰比为0.30时,碳酸钙晶须掺量的提高会增大水泥净浆的干燥收缩;提高水灰比干燥收缩则随碳酸钙晶须掺量提高呈现降低趋势,水灰比为0.40时,4%碳酸钙晶须掺量的水泥净浆干燥收缩较对照组降幅最大。

c. 高掺量的碳酸钙晶须可以显著降低水泥净浆的化学收缩。同一水灰比条件下,随着碳酸钙晶须掺量的提高,化学收缩呈现先升后降的趋势,其中碳酸钙晶须掺量为4%时化学收缩降低效果最显著。

d. 碳酸钙晶须可以显著降低水泥净浆的自收缩。碳酸钙晶须会使净浆提早进入自干燥阶段,显著降低早期自收缩,而后期碳酸钙晶须吸附的水分转移到基体中,发挥了内养护作用,可以减小自干燥收缩,从而改善长期自收缩性能,且此过程中并未生成新的物质。

参考文献:

- [1] 韩建国, 阎培渝, 侯维红. $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}-\text{CaSO}_4-\text{CaO}$ 体系在硅酸盐水泥浆体中的膨胀机理[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(11): 1543-1551. (HAN Jianguo, YAN Peiyu, HOU Weihong. Expansion mechanism of $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}-\text{CaSO}_4-\text{CaO}$ in Portland cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(11): 1543-1551. (in Chinese))
- [2] 陈燕伟, 冯吉利, 李凤晨, 等. 粗骨料体积分数对混凝土Ⅱ型断裂参数的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3939-3949. (CHEN Yanwei, FENG Jili, LI Fengchen, et al. Mode II fracture parameters of concrete with different coarse aggregate volume fractions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3939-3949. (in Chinese))
- [3] 安明喆, 朱金铨, 覃维祖, 等. 粉煤灰对高性能混凝土早期收缩的抑制及其机理研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 27-31. (AN Mingzhe, ZHU Jinquan, QIN Weizu, et al. Study on fly ash restraints on the early shrinkage of high performance concrete and its mechanism[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 27-31. (in Chinese))
- [4] GHAFARI E, GHAFARI S A, COSTA H, et al. Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 43-48.
- [5] SALIBA J, ROZIÈRE E, GRONDIN F, et al. Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 209-217.
- [6] 陈杰, 朱学英, 付梁, 等. 水泥稳定土干缩性能及其尺寸效应[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 114-118. (CHEN Jie, ZHU Xueying, FU Liang, et al. Dry shrinkage performance and size effect of cement stabilized soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,

2022,42(2):114-118. (in Chinese))

[7] CHEN Shuo,ZHAO Haitao,CHEN Yu,et al. Experimental study on interior relative humidity development in early-age concrete mixed with shrinkage-reducing and expansive admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2020,232:117204.

[8] MO L, DENG M, WANG A. Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions[J]. Cement and Concrete Composites,2012,34(3):377-383.

[9] 吴胜兴,孙克纬,沈德建. 新拌混凝土骨料分布均匀性表征方法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (1): 67-75. (WU Shengxing, SUN Kewei, SHEN Dejian. Characterization method and application of the uniformity of aggregate distribution in fresh concrete [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(1):67-75. (in Chinese))

[10] 刘建忠,孙伟,缪昌文,等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2009,39(3):580-585. (LIU Jianzhong,SUN Wei, MIAO Changwen,et al. Effect of mineral admixtures on drying and autogenous shrinkage of concrete with low water-to-binder ratio[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39 (3): 580-585. (in Chinese))

[11] 张彬. 水泥基材料的高温特性及其再水化修复的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

[12] WU Linmei, FARZADNIA N, SHI Caijun, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: a review [J]. Construction and Building Materials, 2017, 149:62-75.

[13] MASTALI M, KINNUNEN P, DALVAND A, et al. Drying shrinkage in alkali-activated binders;a critical review[J]. Construction and Building Materials,2018,190:533-550.

[14] 李黎. 高温后多尺度纤维水泥基材料性能演化规律与微观机理[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[15] 李东升,吴国立,冯思超. 纤维增强水泥基复合材料力学性能的研究进展[J]. 河南科技,2023,42(2):89-92. (LI Dongsheng, WU Guoli, FENG Sichao. Research progress on mechanical properties of fiber-reinforced cement matrix composites [J]. Henan Science and Technology,2023,42(2):89-92. (in Chinese))

[16] LIU Zixing, CAO Mingli, XIE Chaopeng. The mechanical properties of mortar blended with steel-PVA hybrid fibers and CaCO₃ whiskers under freeze/thaw cycles condition [J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2023, 48(4):4451-4469.

[17] 刘子兴. 碳酸钙晶须水泥基复合材料耐磨性与抗冻性[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[18] 曹明莉,许玲,张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报,2016,44(2):246-252. (CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Influence of calcium carbonate whisker on rheology of cement mortar with different water-cement ratios and sand-cement ratios[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016,44(2):246-252. (in Chinese))

[19] ZHANG Xiuzhi, SUN Hailong, YANG Haibo, et al. Rheological properties of nanosilica-modified cement paste at different temperatures and hydration times [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33 (1): 04020404.

[20] 位建强. 碳酸钙晶须增强水泥基复合材料的基础研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.

[21] POWERS T C, BROWNYARD T L. A tribute of the physical properties of hardened Portland cement paste [R]. Farmington Hills: Compressive Strength, American Concrete Institute,2008.

[22] 周文芳. 复合水泥净浆化学收缩影响因素研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.

[23] 刘高鹏,廖宜顺,刘立军,等. 苈麻纤维水泥基材料的力学性能与自收缩试验研究[J]. 功能材料,2019,50(7):7176-7181. (LIU Gaopeng, LIAO Yishun, LIU Lijun,et al. Experimental study on mechanical properties and autogenous shrinkage of cement-based materials with ramie fiber[J]. Journal of Functional Materials,2019,50(7):7176-7181. (in Chinese))

[24] 谢超鹏. 多尺度纤维水泥基复合材料断裂性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[25] CAO Mingli, ZHANG Cong, WEI Jianqiang. Microscopic reinforcement for cement based composite materials [J]. Construction and Building Materials,2013,40:14-25.

(收稿日期:2023-07-14 编辑:熊水斌)

(上接第 65 页)

[10] BATHE K J,BOUZINOV P A. On the constraint function method for contact problems[J]. Computers & Structures, 1997,64(5/6):1069-1085.

[11] 钮新强,宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[12] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. (PENG Sixian, ZHAO Lanhao, MAO Jia. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):90-96. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-27 编辑:俞云利)