

α 和 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料性能的影响

吴福飞, 董双快, 赵本容, 刘春梅, 王凯

(贵州师范大学 材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了探究 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料的改性作用, 采用细度为 30 nm 的 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 、尧柏水泥、标准砂和聚羧酸减水剂制备水泥基材料, 探析 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料的凝结时间、力学性能和收缩性能的影响, 并分析其作用机理。结果表明: α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 均会降低水泥基材料的凝结时间, 提高水泥基材料的抗折强度和抗压强度, 降低水泥基材料的干燥收缩, 但 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料的改性作用低于 α 型纳米 Al_2O_3 。综合本文和文献分析发现, 纳米 Al_2O_3 在水泥基材料中发挥着尺寸效应、填充效应和表面效应, 从而达到改性水泥基材料的力学性能和耐久性。

关键词: 纳米 Al_2O_3 ; 水泥; 力学性能; 收缩性能; 微观形貌

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0172-06

Effect of α and γ type nano- Al_2O_3 on cement base material properties

WU Fufei, DONG Shuangkuai, ZHAO Benrong, LIU Chunmei, WANG Kai

(School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to understand the modification effects of α and γ type nano- Al_2O_3 on the cement base material, the 30 nm α and γ type nano- Al_2O_3 , Yaobai cement, standard sand and carboxylic acid water reducing agent were used to make cement base materials, the setting time, mechanical properties and shrinkage performance and their mechanism were analyzed. The results showed that: The setting time of cement base material can be reduced, the flexural strength and compressive strength of cement base material can be improved, and the drying shrinkage of cement-based materials can be reduced when nano- Al_2O_3 of α and γ type replace cement. But the modification effect of α type nano- Al_2O_3 on cement base material is lower than the γ type. Based on the analysis of this article and literature review, we found that nano- Al_2O_3 of α and γ type in cement base material plays the roles of size effect, filling effect and surface effect, which will achieve the ideas that modified mechanical properties and durability of cement base material.

Key words: Nano- Al_2O_3 ; cement; mechanical property; shrinkage property; microstructure

1 研究背景

水泥基材料是刚性较大而柔性较小的脆性材料, 具有内部多孔、低抗拉强度和低拉伸应变等特性。水泥基材料易受周围环境的影响^[1], 极易在其内部产生微裂纹而出现局部损伤, 这些损伤如不能及时修复, 不但会影响材料的正常使用性能、缩短使

用寿命, 甚至可能由此诱发宏观裂缝并出现脆性断裂, 为了提高水泥基材料的耐久性, 采用矿物掺合料^[2-3]、氧化镁^[4]、纳米 Al_2O_3 等^[5-6]等改性水泥基材料的研究已取得丰硕的成果。

目前, 关于纳米 Al_2O_3 改性水泥基材料的研究成果, 在水化热方面, Nazari 等^[5-6]发现 0.5% ~ 2% 纳米 Al_2O_3 能加速水泥的水化, 并降低浆体的总热量。

收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2018-12-06

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2018]125); 贵州科技厅-贵州师范大学联合基金项目(黔科合 LH 字[2017]7351 号; 贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目(0517073))

作者简介: 吴福飞(1985-), 男, 贵州兴义人, 博士, 副教授, 从事现代水泥混凝土材料与固体废弃物处理技术及生态环境材料的教学与科研工作。

通讯作者: 董双快(1988-), 女, 贵州盘县人, 硕士, 实验师, 从事新型环境材料研发及应用研究。

当掺入 45% 的矿渣时,仍呈现出相似的结果,但纳米 Al₂O₃ 掺量为 3% 时,降低总热量的效果最为显著,且不会随着纳米 Al₂O₃ 掺量的增加呈显著降低的趋势^[7]。在力学性能方面,Arefi^[8] 等研究发现,水胶比为 0.417 时,1%~3% 纳米 Al₂O₃ 能增强砂浆的抗压强度、劈裂强度和抗折强度,部分增强作用达到 70%,但掺量为 5% 对砂浆力学性能却呈现出劣化作用。Li Zhenhua 等^[9] 研究发现,水胶比为 0.4 和掺量为 7% 时,砂浆的抗压强度仍高于纯水泥砂浆,但掺量为 3% 和 5% 时砂浆的抗压强度高于掺量 7%,Nazari 等^[10] 的研究结果却不同,以掺量为 1.0% 时砂浆的力学性能达到最大。Campillo 等^[11] 的研究也不同于前述,他认为纳米 Al₂O₃ 掺量到达 9% 时仍能提高砂浆(水胶比为 0.8)的抗压强度。Oltulu 等^[12-13] 发现水胶比为 0.4 且养护龄期为 180 d 时,1%~2% 纳米 Al₂O₃ 能增强砂浆的力学性能,掺量为 2.5% 时却呈现出降低的趋势,但能改善高温作用后砂浆的残余力学性能。在水化产物方面,Heikal 等^[14] 通过 XRD 和 TG 研究发现,纳米 Al₂O₃ 掺入后降低了 CH 的含量,生成了 CSH、CAH 和 CASH,即纳米 Al₂O₃ 参与反应,形成了 CAH 和 CASH,当减水剂掺入时,CSH 的生成量较多。从 SEM 图片也发现,纳米 Al₂O₃ 掺入后使砂浆的微观结构变得密实,掺减水剂时其微观结构的密实度更高。Nazari 等^[5-7] 也证实,纳米 Al₂O₃ 掺入后能降低水泥基材料的孔隙率。Barbhuiya 等^[15] 通过 FTIR 测试发现光谱中的吸收水波谱带显著降低,浆体变得密实且生成了较多的氢氧化钙晶体,即使掺入微米 Al₂O₃ 也能提高浆体的密实度但会阻止水泥的水化作用。

上述对于纳米 Al₂O₃ 改性水泥基材料的研究虽已取得诸多成果,但水胶比主要集中在 0.4~0.8 之间,对于低水胶比下纳米 Al₂O₃ 改性水泥基材料的研究报道较少。基于此,以 α 型和 γ 型纳米 Al₂O₃ 为研究对象,探讨纳米 Al₂O₃ 晶种和掺量对低水胶比水泥基材料的凝结时间、力学性能、收缩性能的影响,通过这些研究,以期对纳米 Al₂O₃ 改性水泥基材料提供试验基础。

2 材料与方法

2.1 原材料

胶凝材料采用贵州常见的 42.5 级尧柏水泥,其化学成分如表 1 所示。纳米材料采用细度为 30 nm 的 α 型和 γ 型纳米 Al₂O₃,其物理参数见表 2。试验所采用的砂为标准砂,减水剂为聚羧酸减水剂,水采

用实验室自来水。

表 1 试验用水泥的化学成分(质量分数) %

MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Loss
2.47	20.58	5.58	2.84	60.19	2.18	0.18	0.48	4.04

表 2 纳米 Al₂O₃ 的物理参数

晶型	平均粒径/nm	纯度/%	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	体积密度/(g·cm ⁻³)	密度/(g·cm ⁻³)	颜色
α 型	30	>99.9	100	1.5	3.9	白色
γ 型	30	>99.9	160	0.9	3.9	白色

2.2 试验方法

试验主要考虑水灰比、纳米 Al₂O₃ 的种类(α 型和 γ 型)和掺量对水泥基材料凝结时间、力学性能、收缩性能和渗透系数的影响。水灰比分别设计为 0.35 和 0.25,纳米 Al₂O₃ 的掺量为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、4.0%,胶凝材料与标砖砂的比值为 1:1.2,聚羧酸减水剂的最佳掺量根据水泥和纳米 Al₂O₃ 与外加剂流动度最大时来确定。凝结时间、力学性能、收缩性能和渗透系数等试验每组 3 个平行样品,取其平均值为试验结果(单个测试值与平均值允许差值为 ±10%,超过时重做该组试验)。力学性能的试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,在标准养护室(温度为 20±2℃,湿度>90%)养护至规定龄期,参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》等规范测试水泥基材料的力学性能。收缩性能的试件尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm,在湿度为 50% 和温度为 20±2℃ 的养护室养护至规定龄期测试其收缩性能。

3 结果与分析

3.1 凝结时间

纳米 Al₂O₃ 的晶种和掺量对水泥基材料凝结时间的影响图 1 所示。α 型和 γ 型纳米 Al₂O₃ 掺入水泥基材料后,均会缩短水泥基材料的初凝时间和终凝时间,并且 α 型和 γ 型纳米 Al₂O₃ 的掺量越大,其初凝时间和终凝时间缩短的越多。当纳米 Al₂O₃ 的掺量为 4% 时,α 型纳米 Al₂O₃ 水泥基材料的初凝时间和终凝时间分别缩短了 18.7% 和 21.7%;γ 型纳米 Al₂O₃ 水泥基材料的初凝时间和终凝时间分别缩短了 13.4% 和 19.7%。对比 α 型和 γ 型纳米 Al₂O₃ 对水泥基材料凝结时间的缩短作用发现,掺量从 0.5% 增加至 4% 的过程中,γ 型纳米 Al₂O₃ 对水泥

基材料凝结时间的缩短作用低于 α 型纳米 Al_2O_3 , 初凝时间约低 5% 左右, 终凝时间约低 2% 左右。Nazari^[16,7] 的研究也证实了纳米 Al_2O_3 会降低水泥

基材料的初凝时间和终凝时间, 即使对于砂浆、塑性混凝土、自密实混凝土都存在类似的规律。

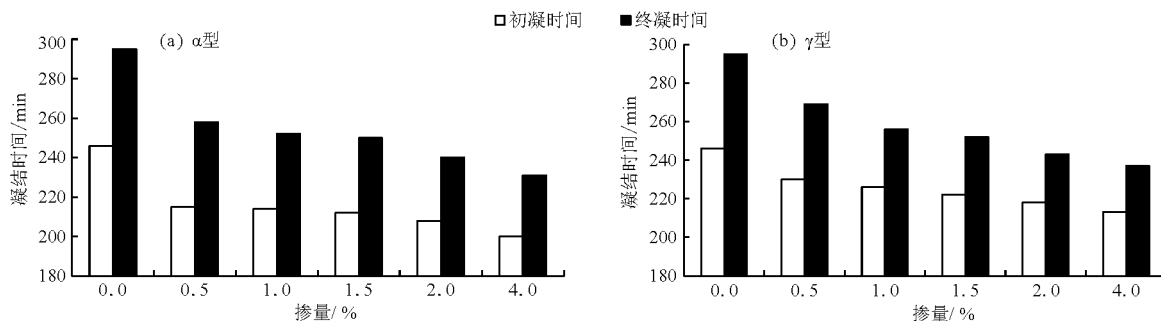


图1 不同纳米 Al_2O_3 晶体和掺量对水泥基材料凝结时间的影响

3.2 抗折强度

水泥基材料的抗折强度采用杭州鑫高科技有限公司生产的 EPC-70 型自动抗折仪进行测试。水胶比为 0.25 时, α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量对水泥基材料抗折强度的影响如图 2 所示; 纳米 Al_2O_3 水泥基材料抗折破坏特征如图 3 所示。 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺入水泥基材料后, 水泥基材料抗折时仍为脆性破坏; 各龄期水泥基材料的抗折强度呈先增大后降低的趋势, 但始终都高于对照组。 α 型纳米 Al_2O_3 的掺量以 1.5% 为宜, 其抗折强度为 14.5 MPa, 约比对照组高 21%; γ 型纳米 Al_2O_3 的掺量以 1.0% 为宜, 其抗折强度为 14.3 MPa, 约比对照组高 19%。对比 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料抗

折强度的增强作用发现, 掺量从 0.5% 增加至 4% 的过程中, γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料抗折强度的增强作用低于 α 型纳米 Al_2O_3 , 各龄期的抗折强度约低 1 MPa 左右。发生这种现象可能与 Al_2O_3 的晶种有关, 在 α 型纳米 Al_2O_3 中, 氧离子为六方紧密堆积, Al^{3+} 对称地分布在氧离子围成的八面体配位中心, 晶格能很大; 在 γ 型纳米 Al_2O_3 中, 氧离子近似是而非为立方面紧密堆积, Al^{3+} 不规则地分布在氧离子围成的八面体和四面体空隙中; 另外, α 型纳米 Al_2O_3 是在 1200℃ 的高温制得; γ 型纳米 Al_2O_3 是在 140~150℃ 的低温环境脱水制得。综上所述, 晶格的差异, 导致纳米 Al_2O_3 对水泥基材料抗折强度的影响也不同。

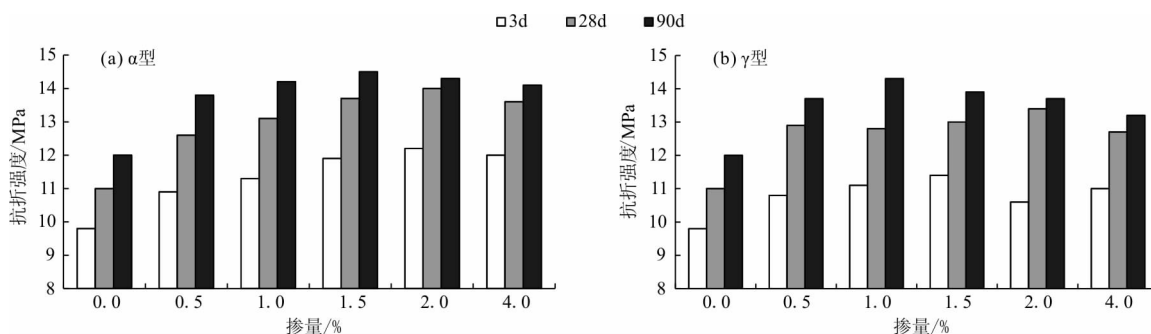


图2 不同纳米 Al_2O_3 晶体和掺量对水泥基材料抗折强度的影响



图3 抗折破坏特征



图4 抗压破坏特征

3.3 抗压强度

水泥基材料的抗压强度采用型号为 YAW-300B 的微机控制电液式水泥压力试验机进行测试。水胶比为 0.35 和 0.25 时, 纳米 Al_2O_3 水泥基材料抗压破坏特征如图 4 所示; α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量对水泥基材料抗压强度的影响如图 5~6 所示。 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺入水泥基材料后, 水泥基材料破坏演变规律同常规水泥基材料相似, 首先在水泥基材料内

部形成微裂缝,逐渐剥落形成灯芯状;另外,各龄期水泥基材料的抗压强度均高于对照组。水胶比为0.35时,掺 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料的抗压强度随掺量的增加而增大,且均高于对照组;其抗压强度最大值分别为73.2和72.5 MPa,比对照组高6.6%和5.5%。水胶比为0.25时,掺 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料的抗压强度随掺量的增加呈先增大后减小的趋势,且均高于对照组,掺量分别以1.0%和1.5%为宜,此时强度分别为84.0和83.5 MPa。对比 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料抗压强度的增

强作用发现,与前述的结果类似, γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料抗压强度的增强作用低于 α 型纳米 Al_2O_3 ,但其差值相对较小,通常不到2 MPa。这与Arefi等^[8]、Li等^[9]、Nazari等^[10]、Campillo等^[11]、Oltulu等^[12-13]的研究结果不同,主要是各研究者设计的水胶比不同,其力学性能的变化就不同;但所有研究结果一致表明,纳米 Al_2O_3 能够提高水泥基材料的抗压强度,只是其增强作用和最佳掺量随水胶比和纳米 Al_2O_3 晶种的变化而变化,即使在矿粉替代水泥作为辅助胶凝材料时仍表现出相似的结果。

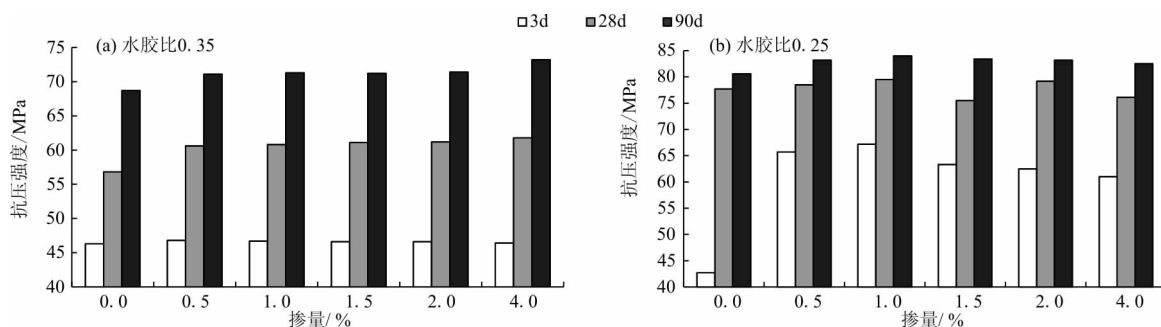


图5 不同水胶比下 α 型 Al_2O_3 对不同龄期水泥基材料抗压强度的影响

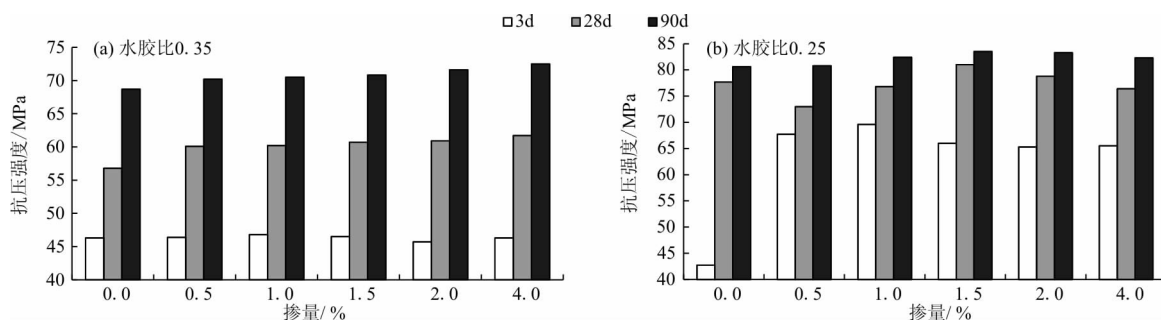


图6 不同水胶比下 γ 型 Al_2O_3 对不同龄期水泥基材料抗压强度的影响

3.4 干燥收缩

干燥收缩是水泥基材料耐久性的重要指标之一,通常受水泥种类、胶凝材料总量、单位用水量、矿物掺合料种类及掺量、环境等因素的影响,水胶比固定为0.25, α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量对水泥基材料干燥收缩的影响如图7所示。由图7可看出,随着 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量的增加,水泥基材料的干燥收缩呈降低的趋势。当纳米 Al_2O_3 掺量为4%且养护时间为60 d时, α 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料的干燥收缩降低了13.7%; γ 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料的干燥收缩降低了19.5%。对比各龄期和各掺量的试验结果也发现, γ 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料的干燥收缩值比 α 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料低。这主要与纳米 Al_2O_3 的物理特性有关, γ 型纳米 Al_2O_3 是一种多孔性物质,每克的内表面积高达数百平方米,能将拌合用水

吸附至其内部,形成“蓄水池”,当外部水分散失后,内部水分能够及时补给;相对而言, α 型纳米 Al_2O_3 的吸附能力稍弱。因此, γ 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料的干燥收缩低于 α 型纳米 Al_2O_3 水泥基材料。

4 纳米 Al_2O_3 在水泥基材料中的作用机理

从上述水泥基材料凝结时间、抗折强度、抗压强度和干燥收缩的试验结果不难发现,适量纳米 Al_2O_3 掺入水泥基材料后,能降低水泥基材料的凝结时间,提高其力学性能和降低水泥基材料的干燥收缩。总结发现,纳米 Al_2O_3 在水泥基材料能发挥3种作用:

(1)尺寸效应:纳米 Al_2O_3 较细,通常在试验中选用的细度为10~1 000 nm,由于颗粒具有更小的

几何尺寸和更高的比表面积,吸水量较大,为了使水泥基材料保持一定的流动性,需要增加拌合用水量。因此许多学者的研究表明,纳米 Al_2O_3 掺入水泥基材料后,水泥基材料的流动性降低并缩短了水泥基材料的初凝时间和终凝时间^[6-8]。

(2)填充效应:本文试验中选用细度为 30 nm 的纳米 Al_2O_3 ,如图 8 所示,在 80 倍的电镜扫描下,纳米 Al_2O_3 掺量为 0 时,水泥基材料有少量的有害孔;当 α 型纳米 Al_2O_3 掺量为 1.0%、 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量为 1.5% 时,纳米 Al_2O_3 水泥基材料的密实度均较高。从本文力学试验结果以及 Arefi 等^[8]、Li Zhenhua 等^[9]、Nazari 等^[10]、Campillo 等^[11]、Oltulu 等^[12-13] 的试验结果也不难证明,纳米 Al_2O_3 能提高水泥基材料的力学性能;Nazari^[5-6] 也证实,纳米 Al_2O_3 掺入后能降低混凝土的孔隙率;Barbhuiya 等^[14] 通过测试也发

现掺入微米 $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ 也能提高浆体的密实度;He Xiaodong 等^[17] 发现,1% 纳米 Al_2O_3 的掺入能提高混凝土的氯离子渗透性能, Oltulu 等^[12-13] 则认为 1.25% 纳米 Al_2O_3 能提高混凝土的渗透性能,其余掺量(0.5% 和 2.5%)有降低作用。综合来看,主要原因就是纳米 Al_2O_3 具有微骨料填充效应,能产生致密势能,减少硬化水泥基材料有害孔的比例,有效地提高了水泥基材料的密实度,但是掺量过多反而会出现劣化作用。

(3)表面效应:通常水泥基材料的水化产物主要是 CH 和 CSH,如图 9(a) 可以看出,纯水泥基材料中形成层状的 CH。纳米 Al_2O_3 颗粒极细,其表面具有很高的活性,从图 9(b) 和 9(c) 可以看出,纳米 Al_2O_3 能参与水泥二次水化形成 CAH 或 CASH,其产物与 CSH 相互交织在一起,使得微观结构变得密实。Heikal 等^[14] 通过 XRD 和 TG 研究也发现,纳米

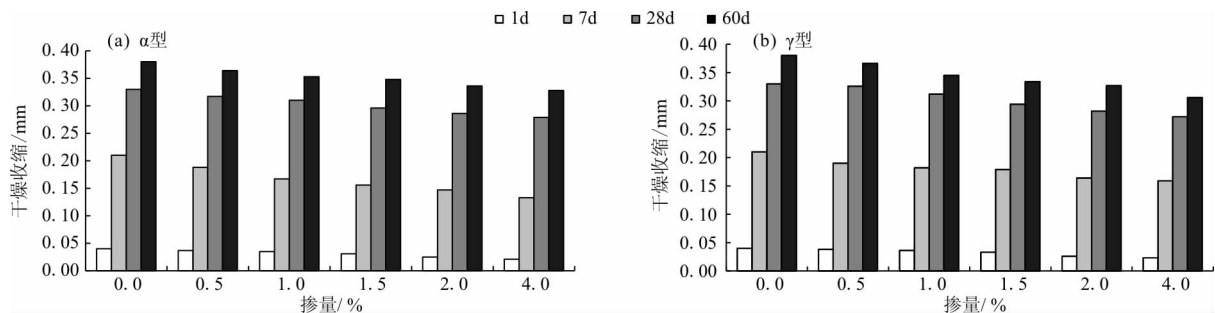


图7 不同纳米 Al_2O_3 晶体和掺量对不同龄期水泥基材料干燥收缩的影响

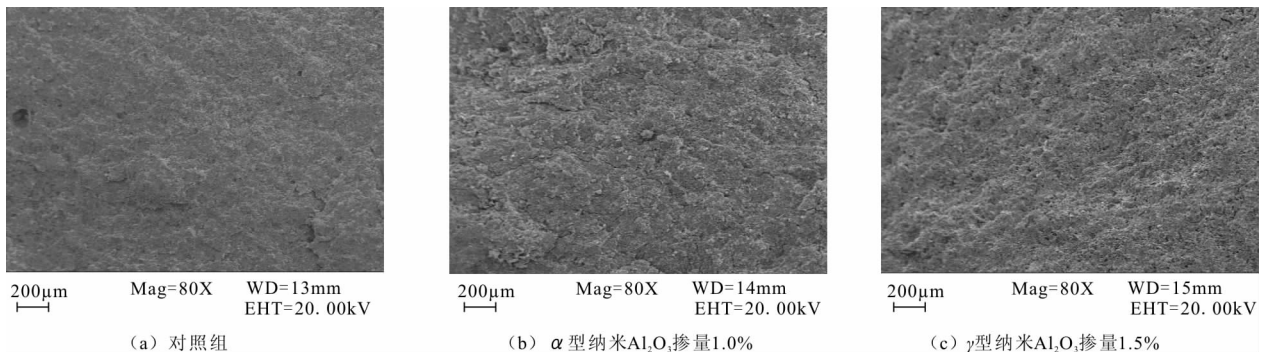


图8 纳米 Al_2O_3 晶体不同掺量水泥基材料养护 28 d 时的密实度

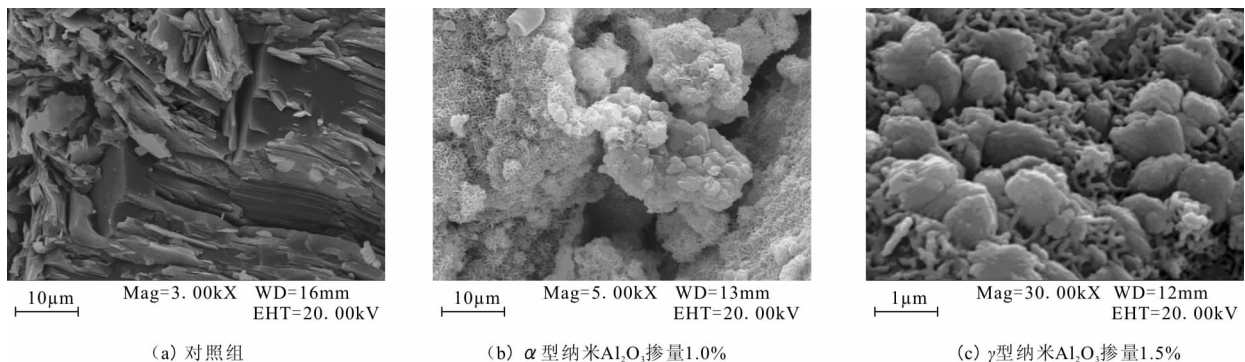


图9 纳米 Al_2O_3 晶体不同掺量水泥基材料养护 28 d 时的水化产物

Al_2O_3 掺入后降低了 CH 的含量,生成了 CSH、CAH 和 CASH;当掺入减水剂时,CSH 的生成量较多。Barbhuiya 等^[15]通过 FTIR 测试发现光谱中的吸收水波谱带显著降低,浆体变得密实,但氢氧化钙晶体含量降低。综合来看,纳米 Al_2O_3 活性高,能与水泥水化后形成的 CH 反应生成 CAH 或 CASH,从而使浆体的微观结构变得密实,进而提高水泥基材料的力学性能和耐久性。

5 结 论

(1) α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 均会降低水泥基材料的初凝时间和终凝时间,掺量越大,凝结时间缩短越多,但 γ 型纳米 Al_2O_3 对水泥基材料凝结时间的缩短作用低于 α 型纳米 Al_2O_3 ,初凝时间约低5%左右,终凝时间约低2%左右。

(2)水胶比为0.25时,水泥基材料的抗折强度和抗压强度随 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量的增加呈先增大后降低的趋势,但始终都高于对照组。 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 的掺量分别以1.5%和1.0%为宜,此时抗折强度分别为14.5和14.3 MPa,约比对照组高21%和19%,抗压强度分别为84.0和83.5 MPa。水胶比增加至0.35时,其抗压强度随纳米 Al_2O_3 掺量的增加呈增大的趋势。另外,随着 α 型和 γ 型纳米 Al_2O_3 掺量的增加,水泥基材料的干燥收缩呈降低的趋势,龄期为60 d时的干燥收缩分别降低了13.7%和19.5%。

(3)纳米 Al_2O_3 对水泥基材料凝结时间、力学性能和干燥收缩具有改性作用,在水泥基材料硬化过程的作用机理主要是尺寸效应、填充效应和表面效应。

参考文献:

- [1] 付腾欢,王瑞骏,何晓莹,等.硫酸盐侵蚀作用下再生混凝土耐久性研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):194-199.
- [2] 吴福飞,董双快,赵振华,等.粉煤灰对砂浆力学性能与孔结构参数的影响[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(3):101-107.
- [3] 吴福飞,邓洪刚,朱丽菊,等.混凝土再生胶凝材料的活性试验研究,贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(5):42-47+53.
- [4] 吴福飞,邓洪刚,董双快,等.轻烧 MgO 活性的影响因素研究[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(1):96-100.
- [5] NAZARI A, RIAHI S. Al_2O_3 nanoparticles in concrete and different curing media[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(6):1480-1488.
- [6] NAZARI A, RIAHI S. Improvement compressive strength of concrete in different curing media by Al_2O_3 nanoparticles [J]. Materials Science & Engineering: A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing), 2011, 528(3):1183-1191.
- [7] NAZARI A, RIAHI S. Effects of Al_2O_3 nanoparticles on properties of self compacting concrete with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as binder[J]. Science China, 2011, 54(9):2327-2338.
- [8] AREFI M R, JAVERI M R, MOLLAHMADI E. To study the effect of adding Al_2O_3 nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of cement mortar [J]. Life Science Journal, 2011, 8(4): 613-617.
- [9] LI Zhenhua, WANG Huafeng, HE Shan, et al. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite[J]. Materials Letters, 2006, 60(3):356-359.
- [10] NAZARI A, RIAHI S, RIAHI S, et al. Mechanical properties of cement mortar with Al_2O_3 nanoparticles [J]. Journal of American Science, 2010, 6(4): 94-97.
- [11] CAMPILLO I, GUERRERO A, DOLADO J S, et al. Improvement of initial mechanical strength by nanoalumina in belite cements[J]. Mater Lett, 2007, 61(8-9):1889-1892.
- [12] OLTULU M, ŞAHİN R. Single and combined effects of nano- SiO_2 , nano- Al_2O_3 and nano- Fe_2O_3 powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(22-23): 7012-7019.
- [13] OLTULU M, ŞAHİN R. Effect of nano- SiO_2 , nano- Al_2O_3 and nano- Fe_2O_3 powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study[J]. Energy and Buildings, 2013, 58: 292-301.
- [14] HEIKAL M, ISMAIL M N. Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al_2O_3 nano-particles [J]. Construction and Building Materials, 2015, 91: 232-242.
- [15] BARBHUIYA S, MUKHERJEE S. Effects of nano- Al_2O_3 on early-age microstructural properties of cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 189-193.
- [16] NAZARI A, RIAHI S. Abrasion resistance of concrete containing SiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles in different curing media[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(10):2939-2946.
- [17] HE Xiaodong, SHI Xianming. Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008 (2070): 13-21.