

纳米 SiO₂ 对掺有硫铝酸盐的水泥基灌浆料强度的影响研究

杨伟

(洛阳璟信公路工程技术发展有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 该文研究了不同粒径的纳米 SiO₂ 以及不同掺量的纳米 SiO₂ 对掺有硫铝酸盐水泥(普通硅酸盐水泥与快硬硫铝酸盐水泥复合系统)灌浆料的抗压强度和抗折强度的影响,同时将研究结果与普通硅酸盐水泥基灌浆料的强度等性能进行对比分析,通过 SEM(微观扫描电镜)分析掺有硫铝酸盐水泥灌浆料微观形貌,进而从机理上分析和解释纳米 SiO₂ 对掺有硫铝酸盐水泥灌浆料性能的影响。试验选用粒径为 15、30 和 50 nm 的纳米 SiO₂,掺量为 1.0%、3.0%和 5.0%,以研究不同粒径及掺量的纳米 SiO₂ 对复合水泥基灌浆料抗折强度和抗压强度的影响。结合 SEM 微观形貌分析结果,解释纳米 SiO₂ 对掺有硫铝酸盐水泥灌浆料力学性能影响的原因。结果表明:50 nm 的纳米 SiO₂ 能显著提高掺有硫铝酸盐水泥灌浆料的抗压强度和抗折强度;纳米 SiO₂ 的最佳掺量均为 1.0%;微观扫描电镜图片表明:纳米 SiO₂ 可以改善掺有硫铝酸盐水泥灌浆料的微观结构,使得水泥浆体的界面过渡区更加均匀致密、结构更加紧凑,有助于掺有硫铝酸盐水泥灌浆料强度的提高。

关键词: 纳米 SiO₂; 硫铝酸盐水泥; 水泥基灌浆料; 强度

1 引言

近年来,新型火山灰材料包括纳米 SiO₂ 已经被广泛应用于土木工程领域,纳米 SiO₂ 需求量越来越大。纳米 SiO₂ 具有较高的纯度(高达 99%以上),且粒径极小,同时纳米 SiO₂ 的火山灰活性要高于其他材料。

大多数文献研究单一尺寸的纳米颗粒对基于一种水泥的水泥基灌浆料性能的影响,然而,几乎很少的文献研究多种尺寸的纳米颗粒对掺有硫铝酸盐水泥灌浆料性能的影响。因此,该文研究的重点就放在不同粒径的纳米 SiO₂ 以及不同掺量的纳米 SiO₂ 对掺有硫铝酸盐水泥(普通硅酸盐水泥与快硬硫铝酸盐水泥复合系统)灌浆料的抗压强度和抗折强度的影响研究,同时将研究结果与普通硅酸盐水泥基灌浆料的强度等性能进行对比,通过 SEM(微观扫描电镜)分析掺有硫铝酸盐水泥灌浆料微观形貌,从机理上分析和解释纳米 SiO₂ 对掺有硫铝酸盐水泥灌浆料性能的影响。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验所用普通硅酸盐水泥及快硬硫铝酸盐水泥的化学组成见表 1。试验采用的纳米 SiO₂ 为 NS15、NS30、NS50(注:NS15 粒径为 15 nm 的 SiO₂,以此类推,下同)3 种粒径的纳米 SiO₂。NS30 的 TEM 透射图如图 1 所示。试验采用标准砂,其颗粒尺寸见表 2。减水剂为聚羧酸高效减水剂,外观为灰白色粉末,pH

表 1 试验材料的化学成分

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
P. O. 42.5 级水泥	15.80	5.47	2.72	48.00	2.13	1.59
R. SAC42.5 级水泥	4.23	11.60	0.97	42.96	2.34	13.58
NS15	66.79	—	—	—	—	—
NS30	79.10	—	—	—	—	—
NS50	68.26	—	—	—	—	—

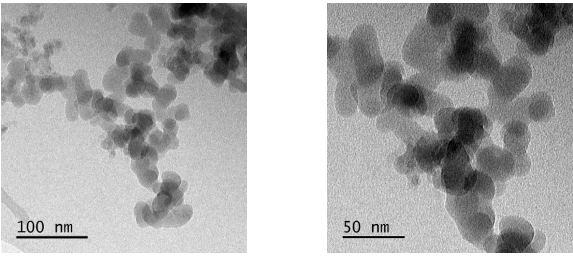


图 1 NS30 的透射电镜(TEM)图

值为 6~8,氯离子含量小于 0.03%,总碱量小于 5%。
试验用水为自来水。

2.2 试验搅拌比例及流程

新拌水泥砂浆采用胶砂比为 1:2 和水胶比为

表 2 标准砂颗粒分布

方筛孔径/ mm	累计筛余/ %	方筛孔径/ mm	累计筛余/ %
2.00	0	0.50	67±5
1.60	7±5	0.16	87±5
1.00	33±5	0.08	99±5

0.35 进行拌和。纳米 SiO₂ (NS15、NS30 和 NS50) 为 0%~5% 的掺量,不同砂浆混合比例见表 3。砂浆的制备流程:① 称出各成分含量;② 把称量好的减水剂、纳米二氧化硅及适量的水倒入一个烧杯,迅速搅拌至悬浊液;③ 将称量好的水泥、砂子、悬浊液和剩余水倒入搅拌锅中进行搅拌。

表 3 砂浆各组分配比方案

砂浆编号	W/B	水/ mL	P. O. 42.5 级水泥/g	R • SAC42.5 级水泥/g	标准砂/ g	纳米 SiO ₂ /g	减水剂/ g
Con	0.35	87.5	160.0	90	500	0	5
NS1.0	0.35	87.5	157.5	90	500	2.5	5
NS3.0	0.35	87.5	155.0	90	500	5.0	5
NS5.0	0.35	87.5	152.5	90	500	7.5	5

注: NS1.0、NS3.0、NS5.0 分别表示在水泥砂浆中掺有 1.0%、3.0%、5.0% 的纳米 SiO₂。

2.3 测试方法

砂浆搅拌完成后,养护到一定龄期进行抗折强度以及抗压强度测试,按 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,试验采用 40 mm×40 mm×160 mm 试块,将试块放在测试抗折强度的夹具上,试验仪器按照 (2 400±200) N/s 速率施加荷载,直到试块被折断,将折断的试块放在测试抗压强度的夹具上,进行抗压强度的测试,试验仪器以 (2 400±200) N/s 速度施加荷载,直到试块被压坏。强度测试之后,取压碎后的水泥试块,放入到容器中,用无水乙醇终止水泥的水化反应,以备后续进行 SEM 测试。

3 结果与讨论

3.1 纳米 SiO₂ 对复合水泥砂浆抗折强度的影响

龄期 28 d 的复合水泥砂浆抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量的变化如图 2 所示。

由图 2 可知:当纳米 SiO₂ 的掺量为 1% 时,3 种粒径纳米 SiO₂ 的掺加均提高了灌浆料的抗折强度,且随着纳米 SiO₂ 粒径的增加,其强度也呈递增趋势。当纳米 SiO₂ 的掺量为 3% 时,仅有 50 nm 粒径的 SiO₂ 增加了灌浆料的抗折强度。当纳米 SiO₂ 的掺量为 5%

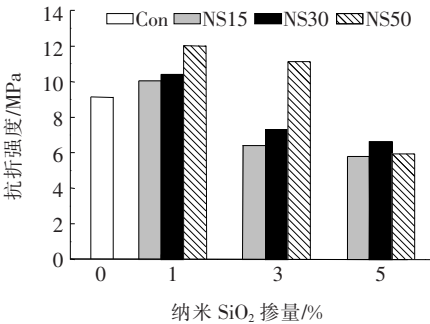


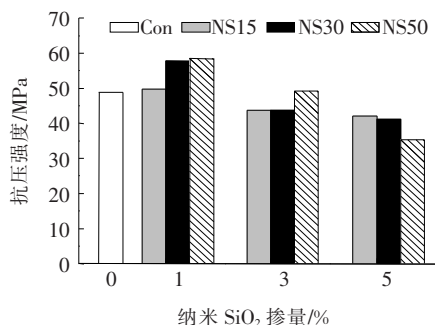
图 2 水泥砂浆 28 d 抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量的变化

时,灌浆料的抗折强度均呈下降趋势。

3.2 纳米 SiO₂ 对复合水泥砂浆抗压强度的影响

龄期为 28 d 的复合水泥砂浆抗压强度随纳米 SiO₂ 掺量的变化如图 3 所示。

由图 3 可知:当纳米 SiO₂ 的掺量为 1% 时,粒径分别为 15、30 和 50 nm 的纳米 SiO₂ 复合水泥砂浆抗压强度较未掺加纳米 SiO₂ 的复合水泥砂浆抗压强度提高,且随着纳米 SiO₂ 粒径的增大而增加。当纳米 SiO₂ 的掺量为 3% 时,仅粒径为 50 nm 的纳米 SiO₂ 使得复合水泥砂浆的抗压强度略有提高。当纳米 SiO₂ 的掺量为 5% 时,掺入纳米 SiO₂ 的粒径为 15、30 和 50 nm 的复合水泥砂浆抗压强度较未掺纳米 SiO₂

图 3 水泥砂浆 28 d 抗压强度随纳米 SiO₂ 掺量的变化

的水泥砂浆抗压强度均减小。

当纳米 SiO₂ 掺量较小时,掺 NS50 的复合水泥砂浆抗折强度和抗压强度要高于掺 NS15 以及 NS30 的复合水泥砂浆。这表明较小粒径的纳米 SiO₂ 不利于纳米颗粒填充效应的发挥,较小粒径的纳米 SiO₂ 附着在水泥颗粒的表面上,而不是作为填充颗粒填充在水泥颗粒之间,从而降低了水泥浆体的水化反应。在这种情况下,纳米材料的火山灰活性以及颗粒的填充作用均未能得到充分发挥,因此影响复合水泥砂浆的抗折强度和抗压强度。当纳米 SiO₂ 掺量较大时,一方面,粒径较小的纳米 SiO₂ 颗粒涂覆在水泥颗粒表面,阻止水泥的水化反应,导致水泥水化不完全;另一方面,不能使纳米材料的火山灰活性及填充效应得到良好的发挥,导致复合水泥砂浆的抗折强度和抗压强度有所下降。由于纳米 SiO₂ 颗粒易凝聚,当纳米 SiO₂ 掺量过大时,纳米颗粒不易分散,导致纳米材料特性未得到完全发挥,使得水泥浆体水化反应不完全,引起复合水泥砂浆强度的下降。当纳米 SiO₂ 掺量较小时,掺有 NS50 的复合水泥砂浆强度最高,这主要是由于该种纳米 SiO₂ 颗粒尺寸为中型的,有利于纳米 SiO₂ 火山灰活性以及填充效应发挥作用,有利于复合水泥砂浆的抗折和抗压强度的提升。

3.3 纳米 SiO₂ 的最佳掺量

图 4~6 为复合水泥砂浆抗折强度随着纳米 SiO₂ 掺量及龄期的变化。由图 4~6 可以看出:当纳米 SiO₂ 的掺量为 0%、1%、3%、5% 时,复合水泥砂浆的抗折强度随龄期的增长而增大;不同粒径的纳米 SiO₂ 在试验所测龄期中,对复合水泥砂浆抗折强度的影响,均表现为:在纳米 SiO₂ 掺量由 0 增加到 1% 时,复合水泥砂浆的抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量增加而增大;当纳米 SiO₂ 掺量持续增加,由 1% 增加到 3% 以及到 5% 时,复合水泥砂浆的抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量的增加而减小。

对于不同粒径的纳米 SiO₂,纳米 SiO₂ 最佳掺量为 1%。当纳米 SiO₂ 掺量为 1% 时,掺入纳米 SiO₂ 粒径为 15、30 以及 50 nm 时,复合水泥砂浆抗折强度分别增长了 12.7%、17.5% 和 43.2%;当纳米 SiO₂ 掺量为 3% 时,仅掺入 NS50 的复合水泥砂浆强度略有提高。当纳米 SiO₂ 掺量为 5% 时,3 种粒径的纳米 SiO₂ 的掺入,均不能提高复合水泥砂浆的抗折强度。

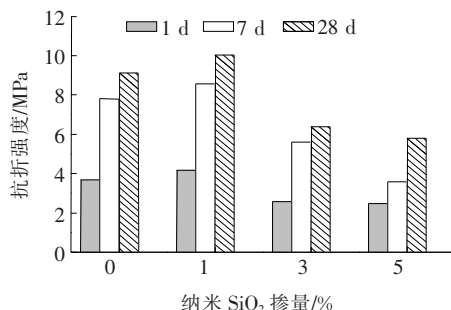
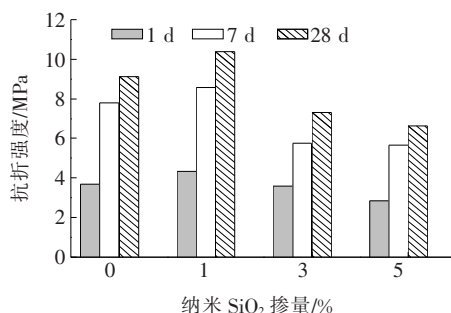
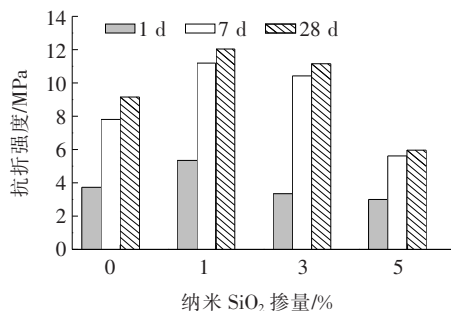
图 4 掺加 NS15 的水泥砂浆抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量、龄期的变化图 5 掺加 NS30 的水泥砂浆抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量、龄期的变化图 6 掺加 NS50 的水泥砂浆抗折强度随纳米 SiO₂ 掺量、龄期的变化

图 7~9 为复合水泥砂浆抗压强度随着纳米 SiO₂ 掺量的变化。

由图 7~9 可以看出:不同粒径的纳米 SiO₂ 在试验所测龄期中,对复合水泥砂浆抗压强度的影响,均表

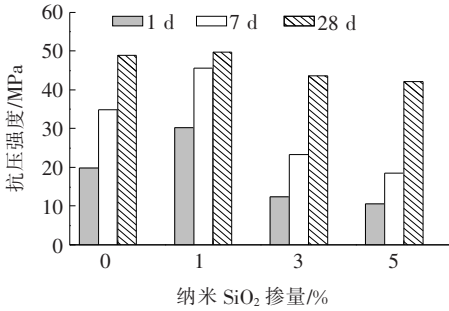


图 7 掺加 NS15 的水泥砂浆抗压强度随纳米 SiO₂ 掺量龄期的变化

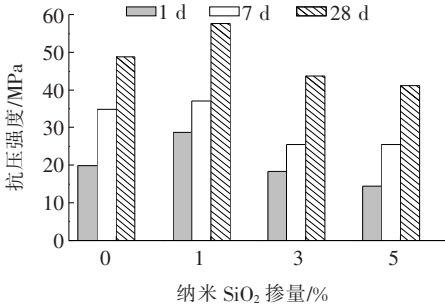
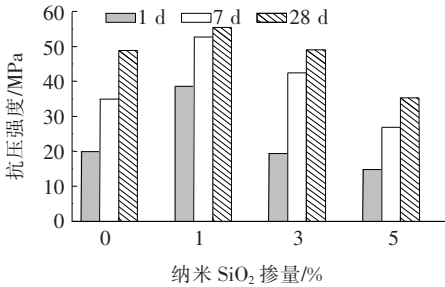
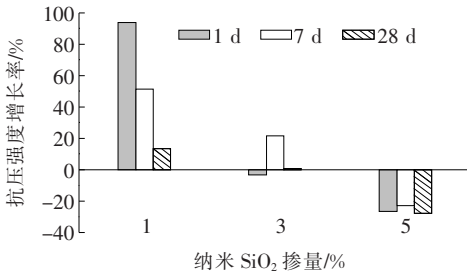


图 8 掺加 NS30 的水泥砂浆抗压强度随纳米 SiO₂ 掺量龄期的变化



(a) 抗压强度



(b) 抗压强度提高率

图 9 掺加 NS50 的水泥砂浆抗压强度随纳米 SiO₂ 掺量龄期的变化

现为:在纳米 SiO₂ 掺量由 0 增加到 1% 时,复合水泥砂浆的抗压强度随掺量增加而增大;当纳米 SiO₂ 掺量持续增加,由 1% 增加到 3% 以及 5% 时,复合水泥砂浆的抗压强度随纳米 SiO₂ 掺量增加而降低。因此,不

同粒径的纳米 SiO₂,纳米 SiO₂ 最佳掺量为 1%。当纳米 SiO₂ 掺量为 1% 时,掺入纳米 SiO₂ 粒径为 15、30 和 50 nm,复合水泥砂浆抗压强度分别增长了 51.4%、43.8% 和 93.8%;当纳米掺量为 3% 时,仅掺有 NS50 的复合水泥砂浆抗压强度略有提高;当纳米 SiO₂ 掺量增加到 5% 时,掺有纳米 SiO₂ 的复合水泥砂浆抗压强度均不能得到提高。

当纳米 SiO₂ 掺量较少($\leq 1\%$)时,纳米 SiO₂ 得到良好的分散,使纳米材料的火山灰活性得到充分发挥,促进水泥浆体的水化反应。同时,由于纳米 SiO₂ 颗粒的填充效应,减小了水泥浆体内部的有害孔,沉淀下的水化产物作为胶凝材料,填补了水泥浆体内部存在的开口孔隙,使得水泥浆体内部结构更加致密化。另外,快硬硫铝酸盐水泥的掺入,加速了水泥水化过程,促进钙矾石的生成,钙矾石的积累填充孔隙,优化了水泥浆体的界面过渡区。钙矾石具有较大的比体积,可以在一些孔隙中沉淀,填充孔隙,从而导致水泥浆体强度较大。同时,在硫铝酸钙水化过程中,作为胶凝材料铝胶的生成,增强了水泥颗粒之间的黏结强度,综合作用,使得水泥浆体的强度得到较好的提高。

当纳米 SiO₂ 掺量较多($\geq 1\%$)时,纳米 SiO₂ 含量较大,纳米 SiO₂ 在水泥浆体中不宜分散均匀,使得纳米 SiO₂ 的填充效应及火山灰活性不能得到良好的发挥,纳米 SiO₂ 粉体因掺量较大易团聚,导致复合水泥砂浆的强度下降。然而,最佳掺量的纳米 SiO₂ 并不是一个固定的百分比,取决于许多因素,比如纳米 SiO₂ 的类型(胶体、悬浊液或者粉体等)。

3.4 微观形貌分析

为了研究各工况下试块界面过渡区的微观形貌,采用 TM-1000 型台式扫描电镜进行分析(图 10、11)。图 10~15 中:1 为 Ca(OH)₂ 晶体,2 为 C-S-H 凝胶,3 为孔隙。图 11、12 分别为未掺加纳米 SiO₂ 的复合水泥砂浆与掺入 1% 的 NS15 复合水泥砂浆的微观扫描电镜图,养护龄期均为 7 d。

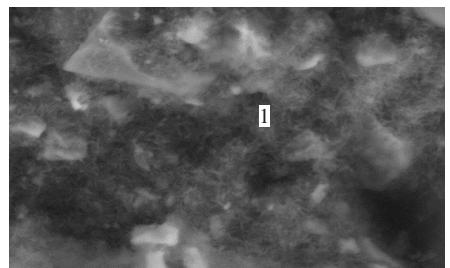
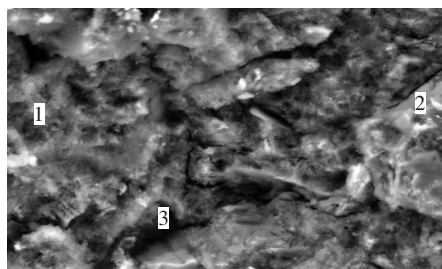
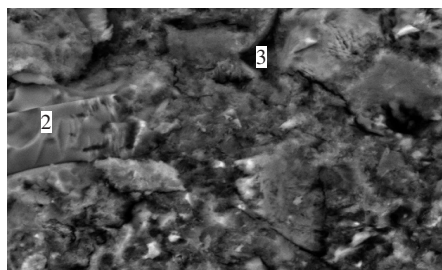
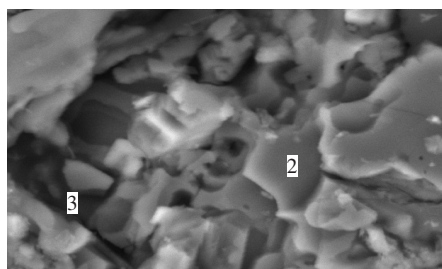
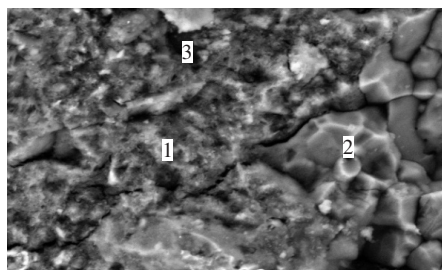
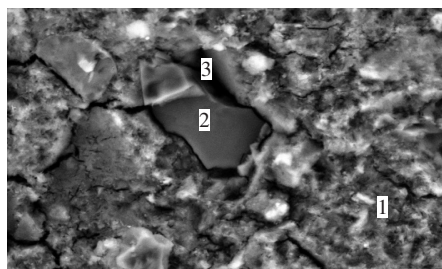


图 10 未掺纳米 SiO₂ 的净浆

图 11 掺有 NS15/1.0 的纳米 SiO_2 的净浆图 12 掺有 NS30/1.0 的纳米 SiO_2 的净浆图 13 掺有 NS50/1.0 的纳米 SiO_2 的净浆图 14 掺有 NS50/3.0 的纳米 SiO_2 的净浆图 15 掺有 NS50/5.0 的纳米 SiO_2 的净浆

由图 10、11 可知: 纳米 SiO_2 的掺入, 使得复合水泥砂浆界面过渡区的胶凝物质出现较多, 细化复合水泥砂浆界面过渡区的孔隙, 从而使得复合水泥砂浆界面过渡区孔隙分布均匀。当纳米 SiO_2 掺量较少时, 其火山灰活性发挥较好, 促进水泥浆体水化反应的进行, 生成 C—S—H 凝胶, 因此水泥浆体界面过渡区变得更加致密, 从而使得复合水泥砂浆强度得到提高。

由图 10~13 可知: 掺入纳米 SiO_2 使得水泥浆体界面过渡区针状的 CH 晶体有所减少, 水泥浆体水化产物的结构变得更加均匀、致密和紧凑。这主要是由于纳米 SiO_2 颗粒填充了水泥颗粒之间的孔隙, 使孔隙变得更小, 当纳米 SiO_2 掺量较多时, 这些纳米 SiO_2 颗粒便会覆盖在水泥浆体表面, 阻止水泥浆体水化反应的进行, 减小了水泥浆体的强度; 另一方面, 纳米 SiO_2 粉体的不易分散、易团聚的特点, 导致纳米 SiO_2 颗粒的填充效应以及火山灰活性不能得到良好的发挥, 从而降低了水泥浆体的强度。当纳米 SiO_2 掺量较少时, 粒径为 50 nm 的 SiO_2 是一个较为合适的颗粒尺寸, 可以填充到水泥颗粒之间的孔隙中, 能够均匀分散在水泥浆体中, 从而使水泥浆体的界面过渡区更加致密紧凑。

图 13~15 分别为复合水泥砂浆中掺入 NS50 的纳米 SiO_2 , 掺量分别为 1%、3% 以及 5% 的复合水泥砂浆的微观扫描电镜图, 养护龄期同样均为 7 d。由图 13~15 可知: ① 掺入纳米 SiO_2 的水泥浆体, 水化产物的微观形貌更加致密和密实, 针状的 CH 晶体含量较少。这主要是由于纳米 SiO_2 的火山灰活性及填充效应引起的, 由于纳米 SiO_2 的火山灰活性与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体反应, 使得 C—S—H 胶体得到沉淀, 从而形成更为紧密的结构。由于纳米 SiO_2 的填充作用, 不仅对毛细孔, 而且对纳米级的凝胶孔都有良好的填充作用, 使得试块的大孔隙减少, 孔隙分布比较均匀; ② 当纳米 SiO_2 掺量较多时, 水化产物的微观形貌不如纳米 SiO_2 掺量较少的致密、密实, 这主要是由于纳米 SiO_2 颗粒含量较多时, 便会覆盖在水泥浆体表面, 阻止水泥浆体进行水化反应, 导致水泥浆体强度的下降; 另一方面, 纳米 SiO_2 粉体的不易分散、易团聚的特点, 且团聚粒径较大, 不能很好地填充水泥颗粒之间的空隙, 导致纳米 SiO_2 颗粒的填充效应以及火山灰活性不能得到良好的发挥, 从而导致水泥浆体强度较低。

4 结论

主要研究了不同粒径的纳米 SiO_2 对掺有硫铝酸盐水泥灌浆料强度的影响, 通过对比纳米 SiO_2 的掺

量,得出了纳米 SiO_2 的最佳掺量,得到结论如下:

(1) 纳米 SiO_2 粒径直接影响着掺有硫铝酸盐水泥灌浆料的抗折强度,粒径为 50 nm 的 SiO_2 使掺有硫铝酸盐水泥灌浆料抗折强度达到 31.5% 的最大提高,而粒径为 15、30 nm 的 SiO_2 使掺有硫铝酸盐水泥灌浆料抗折强度分别增长了 9.9% 和 13.9%。

(2) 纳米 SiO_2 粒径直接影响着掺有硫铝酸盐水泥灌浆料的抗压强度,粒径为 50 nm 的 SiO_2 对掺有硫铝酸盐水泥灌浆料的抗压强度提高了 19.7%,而掺入粒径为 15、30 nm 的 SiO_2 的掺有硫铝酸盐水泥灌浆料抗压强度分别增长了 1.9% 和 18.2%。

(3) 不同粒径的纳米 SiO_2 的最佳掺量均为 1%,且纳米 SiO_2 的最佳掺量与纳米 SiO_2 的粒径无关。

(4) 微观扫描电镜图片表明:纳米 SiO_2 可以改善掺有硫铝酸盐水泥灌浆料的微观结构,使得水泥浆体的界面过渡区更加均匀致密、结构更加紧凑,有助于掺有硫铝酸盐水泥灌浆料强度的提高。

参考文献:

- [1] Qing Y, Zenan Z, Deyu K, et al. Influence of Nano-SiO₂ Addition on Properties of Hardened Cement Paste As Compared with Silica Fume[J]. Constr Build Mater, 2007,21:539-545.
- [2] F. Sanchez, K. Sobolev. Nanotechnology in Concrete—a Review[J]. Construction and Building Materials, 2010,24(11):2 060-2 071.
- [3] M. Stefanidou, I. Papayianni. Influence of Nano-SiO₂ on the Portland Cement Pastes[J]. Composites Part B: Engineering, 2012,43(6):2 706-2 710.
- [4] A. Nazari, S. Riahi. Microstructural, Thermal, Physical and Mechanical Behavior of the Self Compacting Concrete Containing SiO₂ Nanoparticles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010,527(29-30):7 663-7 672.
- [5] A. Sadrilmomtazi, A. Fasihi, F. Balalaei, et al. Investigation of Mechanical and Physical Properties of Mortars Containing Silica Fume and Nano-SiO₂ [C]. in: Third International Conference on Concrete and Development, Tehran, Iran, 27-29 April, 2009:1 153-1 161.
- [6] Li H, Xiao HG, Yuan J, et al. Microstructure of Cement Mortar with Nanoparticles[J]. Compos Part B-Eng, 2004,35:185-189.
- [7] Li H, Xiao HG, Ou JP. A Study on Mechanical and Pressure-Sensitive Properties of Cement Mortar with Nanophase Materials[J]. CemConcr Res, 2004;34:435-438.
- [8] Li H, Zhang MH, Ou JP. Abrasion Resistance of Concrete Containing Nanoparticles for Pavement [J]. Wear 2006,260:1 262-1 266.
- [9] Li H, Zhang MH, Ou JP. Flexural Fatigue Performance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement [J]. Int J Fatigue, 2007,29:1 292-1 301.
- [10] Senff L, Labrincha JA, Ferreira VM, et al. Effect of Nanosilica on Rheology and Fresh Properties of Cement Pastes and Mortars [J]. Constr Build Mater, 2009,23:2 489-2 491.
- [11] Mondal P, Shah SP, Marks L. A Reliable Technique to Determine the Local Mechanical Properties at the Nanoscale for Cementitious Materials [J]. Cem Concr Res, 2007,37:1 440-1 444.
- [12] Jo BW, Kim CH, Tae GH, et al. Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles [J]. Constr Build Mater, 2007,21:1 351-1 355.
- [13] Chen RS, Ye Q. Research on the Comparison of Properties of Hardened Cement Paste between Nano-SiO₂ and Silica Fume Added [J]. Concrete, 2002,1:7-10.
- [14] 黄娟,韩雪. 纳米改性路用混凝土抗盐冻性能试验研究 [J]. 中外公路, 2018(4).
- [15] 叶超,陈华鑫,王闯. 纳米二氧化钛改性沥青混合料路用性能研究 [J]. 中外公路, 2010(6).
- [16] 郭诗惠,刘炳. 纳米材料复配对 SBS 改性沥青流变及抗老化性能的影响 [J]. 中外公路, 2019(6).
- [17] 张茂花,杨静,刘亚静. 纳米材料对低掺量水泥土早期强度的影响 [J]. 中外公路, 2015(6).
- [18] Tang M, Ba H, Li Y. Study on Compound Effect of Silica Fume and Nano-SiO_x for Cement Composite Materials [J]. J Chin Ceram Soc, 2003,31:523-527.
- [19] Lin DF, Tsai MC. The Effects of Nanomaterials on Microstructures of Sludge Ash Cement Paste [J]. J Air Waste Manage Assoc, 2006,56:1146.
- [20] Shih JY, Chang TP, Hsiao TC. Effect of Nanosilica on Characterization of Portland Cement Composite [J]. Mater Sci Eng A-Struct, 2006,424:266-274.
- [21] Sattawat Haruehansapong, Tawich Pulngern, Somchai Chucheeesakul. Effect of the Particle Size of Nanosilica on the Compressive Strength and the Optimum Replacement Content of Cement Mortar Containing Nano-SiO₂ [J]. Construction and Building Materials, 2014(50):471-477.
- [22] Yuan J, Zhou S, Gu G, et al. Effect of the Particle Size of Nanosilica on the Performance of Epoxy/Silica Composite Coatings [J]. J Mater Sci, 2005(40):3 927-3 932.
- [23] Singh LP, Karade SR, Bhattacharyya SK, et al. Beneficial Role of Nanosilica on Cement Based Materials—a Review [J]. Constr Build Mater, 2013(47):1 069-1 077.