

纳米 CuO 改性水泥基材料力学与耐久性的试验研究

吴福飞, 赵振华, 董双快, 刘春梅, 周开州
(贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了明确纳米 CuO 对低水胶比水泥基材料力学性能和耐久性的改性作用, 采用 0.5% ~ 4% 纳米 CuO 制备水泥基材料, 研究其对凝结时间、流动性、力学性能和耐久性的影响, 并分析其作用机制。试验结果表明: 0.5% ~ 4.0% 纳米 CuO 能降低低水胶比水泥基材料的凝结时间和流动性, 掺量越多, 其降低幅度越大; 1.0% ~ 4.0% 纳米 CuO 能提高低水胶比水泥基材料的抗折和抗压强度, 但会降低其干燥收缩和渗透性能, 掺量以 2% 为宜; 纳米 CuO 替代水泥后, 虽不能参与水泥的二次水化, 但能促进水泥的水化; 综合分析发现, 纳米 CuO 能发挥尺寸效应、微集料的填充效应和表面活性效应, 达到提高水泥基材料密实度和细化孔结构的目的。因此, 纳米 CuO 替代水泥后, 能在一定程度上改性低水胶比水泥基材料的力学性能和耐久性。

关键词: 纳米 CuO; 力学性能; 干燥收缩; 渗透性能; 改性水泥基材料

中图分类号: TV41

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0177-06

Experimental study on mechanics and durability of nano - CuO modified cement-based materials

WU Fufei, ZHAO Zhenhua, DONG Shuangkuai, LIU Chunmei, ZHOU Kaizhou

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

Abstract: In order to understand the modify mechanical properties and durability of cement-based materials with low water-binder ratio, the cement-based materials were prepared with 0.5% ~ 4% nano - CuO, and the influence and mechanism on setting time, liquidity, mechanical properties, and durability were analyzed. The results showed that 0.5% ~ 4.0% nano-CuO could reduce the setting time and liquidity of cement-based materials. The bigger the dosage, the more the lower amplitude. 1% ~ 4.0% nano - CuO could improve the flexural strength and compressive strength of cement-based materials, and reduce the drying shrinkage and permeability of cement-based materials, with 2% the best. Although nano - CuO could not participate in the secondary hydration of cement, it did promote the hydration of cement; Through comprehensive analysis, we found that nano - CuO can exert size effect, filling effect of micro-aggregate and surface activity effect, which can achieve the purpose of improving the compactness of cement-based materials and refining pore structure. Therefore, we conclude that nano - CuO can modify the mechanical properties and durability of cement-based materials to a certain extent after replacing cement.

Key words: nano - CuO; mechanical property; drying shrinkage; permeability; modified cement-based materials

1 研究背景

随着混凝土配制技术的发展, 混凝土以其优良的性能、可模性好以及低廉的价格, 在房屋、水利、桥

梁、市政等工程中获得了较为广泛的使用^[1-2]。在混凝土长期的服役期, 常因混凝土开裂、收缩等问题而使混凝土结构过早发生破坏, 因此, 混凝土的改性技术已成为了研究的热点问题。

收稿日期: 2019-02-08; 修回日期: 2019-03-16

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-), 男, 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。

纳米金属氧化物改性水泥基材料是将纳米金属氧化物颗粒掺入水泥基材料,一同搅拌、浇筑成型得到的复合材料,重点考察纳米金属氧化物对水泥基材料流动性能、抗折和抗压强度、耐久性和微观结构的改性作用。目前,用于改善水泥基材料性能的纳米金属氧化物主要有纳米 Al_2O_3 ^[3]、纳米 Fe_2O_3 ^[4]、纳米 ZnO_2 ^[5]、纳米 TiO_2 ^[6]、纳米 CuO ^[7] 和纳米 MgO ^[8-9] 等,由于这些纳米金属氧化物颗粒的物理化学性能不同,因而对水泥砂浆、混凝土的改性作用存在差异,但均能在一定程度上改善水泥基材料的宏观力学性能和耐久性。纳米材料颗粒超细,是否会影响水泥基材料的流动性,国内外的研究者做了许多的研究工作,取得了一定的研究成果。Nazari 等^[10-11] 研究发现水胶比为 0.4 时,纳米 Al_2O_3 对砂浆流动性有显著的劣化作用,随着掺量的增加其流动性越小,同时也会缩短砂浆的初凝时间和终凝时间。采用纳米 Al_2O_3 替代水泥配制混凝土时,混凝土的流动性基本呈现出降低趋势。Arefi 等^[12] 研究发现,水胶比为 0.417 时,1%~3% 纳米 Al_2O_3 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。Madandoust 等^[13] 研究发现,1%~5% 纳米 CuO 对水胶比为 0.40 的自密实混凝土抗压强度有增强作用,掺量以 3% 为宜;也会增大自密实混凝土的电阻率,掺量为 4% 时达到最大;但在一定程度上降低了自密实混凝土的渗透性能,掺量为 4% 时达到最小值。Nazari 等^[14-15] 发现,纳米 CuO 掺量为 1%~5%、水灰比为 0.50 时,自密实混凝土的抗压强度分别提高了 4.11%、13.29%、31.64%、48.42% 和 44.3%;劈裂强度提高了 -12.5%、12.5%、43.75%、68.75% 和 50%;孔隙率分别降低了 9.2%、13.25%、16.04%、18.82% 和 17.57%,但掺量均以 4% 为宜。

从上述的研究发现,纳米金属氧化物在自密实混凝土的研究中主要集中在力学性能、氯离子渗透性能、吸水速率和孔隙率方面,在低水胶比水泥基材料中的研究相对较少,有待进一步深入研究探讨。基于上述的研究情况,本文以低水胶比水泥基材料为研究对象,探索纳米 CuO 掺量对水泥基材料凝结时间、流动性、抗折、抗压强度、干燥收缩以及渗透性能的影响,并通过微观扫描和已有文献的研究情况,进一步探索纳米 CuO 在水泥基材料中的作用机制,为纳米混凝土的配制与推广提供试验基础。

2 材料与方法

2.1 原材料

水泥采用尧柏普通硅酸盐水泥(P·O42.5),密度为 3.06 g/cm^3 ,比表面积为 $365 \text{ m}^2/\text{kg}$,标稠为 27.5%,主要的化学成分如表 1。砂为标准砂,减水剂是减水率为 35%~40% 的高效减水剂,水是实验室的自来水。纳米材料为纳米氧化铜,化学式 CuO ,是一种金属氧化物,外观呈黑色,相对分子量为 79.5,密度为 6.49 g/cm^3 ,熔点为 1026°C ,平均粒径为 30 nm,纯度大于 99.9%。

表 1 尧柏水泥的化学成分 %

CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
60.19	20.58	2.84	2.47	5.58	2.18	0.48	0.18	4.03

2.2 试验方法

为了考虑水胶比和纳米 CuO 掺量对水泥基材料性能的影响,试验中水胶比设计为 0.35 和 0.25,纳米 CuO 的掺量为 0(空白组)、0.5%、1%、2% 和 4%。抗折、抗压强度和渗透性能试验的试件尺寸为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$;干燥收缩试验采用尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 的试件,参考《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2017)进行,渗透性能试验依据 ASTM C 642^[16] 的测试方法进行。每组试样 5 个平行样品,取试验结果相近的 3 个样品的平均值作为试验结果,其余试验结果均剔除。

3 结果与分析

3.1 凝结时间与流动性

图 1 和 2 分别为纳米 CuO 对水泥基材料凝结时间和流动性的影响。由图 1 可以看出,水泥基材料的初凝时间和终凝时间随纳米 CuO 掺量的增加呈线性降低的趋势,相关系数均在 0.90 以上。0.5%~4.0% 纳米 CuO 颗粒掺入水泥基材料后,初凝时间和终凝时间分别降低了 2.5%~18.0% 和 5.9%~22.9%,相对而言,纳米 CuO 对水泥基材料终凝时间的降低率高于初凝时间 1.3~3.0 倍。纳米 CuO 也会显著降低水泥基材料的坍落度,如图 2 所示。在水胶比为 0.35 时,0.5%~4.0% 纳米 CuO 水泥基材料的坍落度降低了 10.5%~31.4%。在水胶比为 0.25 时,降低了 4.3%~14.9%。可见,水胶比越低,加入相同量的纳米 CuO 后,水泥基材料坍落度的降低幅度越小。这主要是由于纳米 CuO 颗粒吸湿性强,进而降低了水泥基材料中的水分,因此显著降低了水泥基材料的凝结时间和坍落度。Heikal

等^[3]、Shekari 等^[17]、Arefi 等^[12]、Qing 等^[8] 对 纳 米 Fe₃O₄、纳米 Fe₂O₃、纳米 Al₂O₃ 和 纳 米 MgO 等 的 研 究 结

果也发现,纳米材料的掺量越大,则水泥基材料和易性的降低幅度越大。

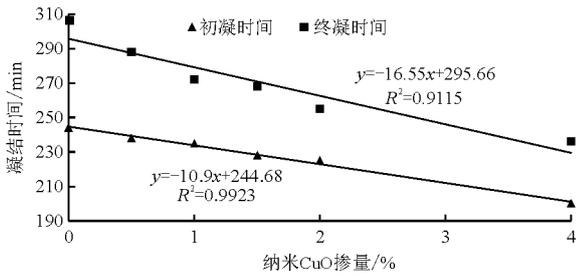


图 1 纳米 CuO 不同掺量对水泥基材料凝结时间的影响

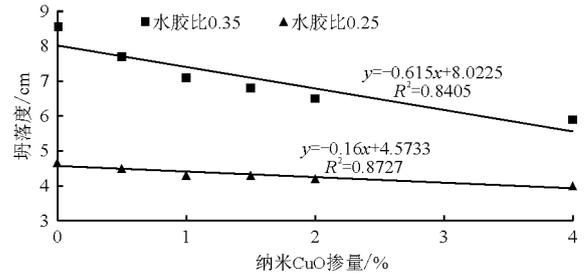


图 2 纳米 CuO 不同掺量对水泥基材料流动性的影响

3.2 力学性能

抗折强度(试验机如图 3 所示)和抗压强度(试验机如图 4 所示)是水泥基材料强度等级评定的重要指标,图 5 和 6 为纳米 CuO 掺量对水泥基材料抗折强度和抗压强度的变化规律。

强度呈先增大后降低的变化趋势,但各龄期的抗折强度均高于空白组,且掺量均以 2% 为宜。纳米 CuO 掺量为 2%,水胶比为 0.35 水泥基材料 3、7、28、90 d 的抗折强度约比空白组高 5.6%、4.3%、5.0% 和 8.7%,水胶比为 0.25 水泥基材料 3、7、28、90 d 的抗折强度约比空白组高 3.1%、20.4%、8.9% 和 10.1%。由此可见,纳米 CuO 对不同水胶比水泥基材料的抗折强度均有增强作用。纳米 CuO 掺量为 2%,水胶比为 0.25 时水泥基材料的抗折强度约比水胶比为 0.35 时高 5.3%、34.0%、28.6% 和 26.8%,这也进一步说明了水胶比越低,水泥基材料的抗折强度越高。纳米 CuO 掺量为 0~4%、水胶比分别为 0.35 和 0.25 时,水泥基材料 3 d 的抗折强度约分别为 28 d 时的 89.0%、91.2%、89.5%、88.5% 和 77.4%、76.0%、73.3%、75.8%;可见,水胶比不同,则水泥的水化程度不同,进而对水泥基材料力学性能的贡献也不同。

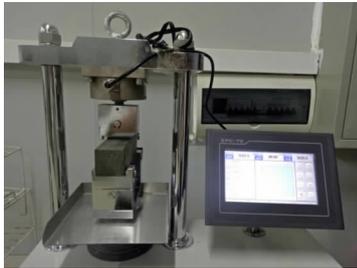


图 3 抗折试验机



图 4 抗压试验机

由图 5 的变化规律可知,随着纳米 CuO 掺量从 0 增加至 4% 时,对于同一养护龄期,水泥基材料的抗折

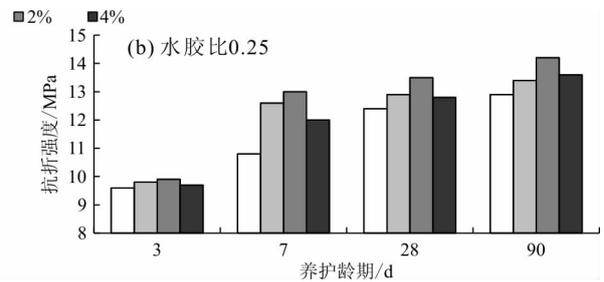
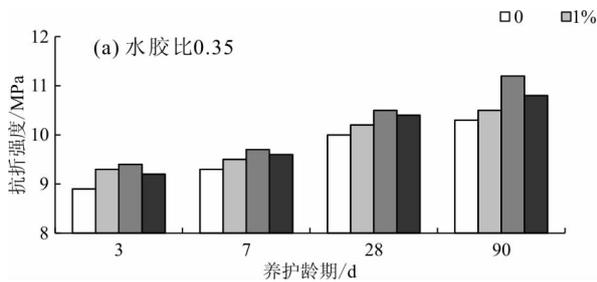


图 5 纳米 CuO 不同掺量的水泥基材料的抗折强度

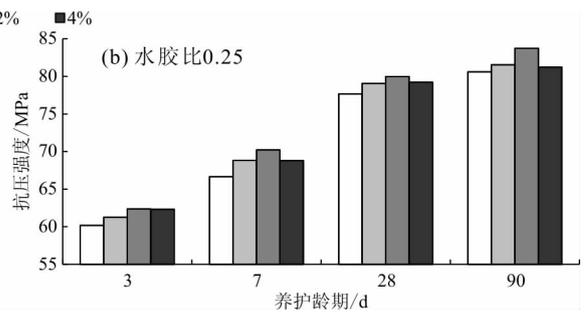
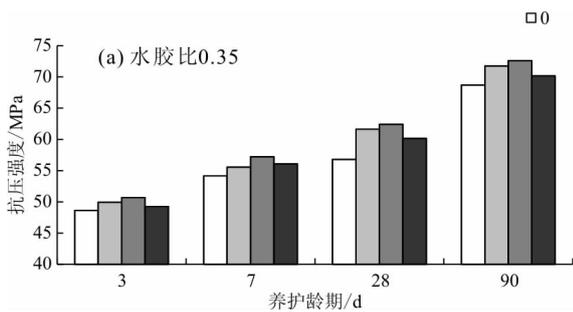


图 6 纳米 CuO 不同掺量的水泥基材料的抗压强度

由图6的变化规律可知,随着纳米CuO掺量从0增加至4%时,对于同一养护龄期,水泥基材料的抗压强度呈先增大后降低的变化趋势,各龄期的抗压强度均高于空白组,且掺量均以2%为宜,这与抗折强度的变化规律一致。纳米CuO掺量为2%、水胶比为0.35水泥基材料3、7、28、90d的抗折强度约比空白组高4.2%、5.7%、9.9%和5.7%,水胶比为0.25水泥基材料3、7、28、90d的抗折强度约比空白组高3.7%、5.4%、3.0%和3.9%。可见,纳米CuO对不同水胶比水泥基材料的抗压强度均有增强作用;在水胶比为0.25时,纳米CuO掺量对水泥基材料抗折强度的增强作用高于抗压强度。纳米CuO掺量为2%、水胶比为0.25时水泥基材料3、7、28、90d的抗压强度约为水胶比为0.35时高23.1%、22.7%、28.2%和15.3%,结合抗折强度的试验结果发现,水胶比越低,水泥基材料早期抗压强度相对较高,后期抗折强度相对较高。纳米CuO掺量为0~4%、水胶比为0.35和0.25时,水泥基材料3d的抗折强度约为28d时的85.6%、81.0%、81.2%、81.9%和77.5%、77.5%、78.0%、78.7%,这与抗折强度的变化规律基本相同,在实际工程中,可初步采用3d的力学性能预测28d的力学性能。

Madandoust等^[13]研究发现,25%粉煤灰自密实混凝土中掺入1%~5%纳米CuO时,纳米CuO对水胶比为0.40的自密实混凝土抗压强度有增强作用,掺量以3%为宜。Nazari等^[14]的试验发现,养护龄期为28d且纳米CuO掺量为1%~5%时,水胶比为0.50的自密实混凝土抗压强度提高了4.11%、13.29%、31.64%、48.42%和44.3%,即掺量为4%时,自密实混凝土的抗压强度最高。另外,Nazari等^[15]的试验也发现,养护龄期为28d且纳米CuO掺量为1%~5%,水胶比为0.40的自密实混凝土劈裂强度提高了-12.5%、12.5%、43.75%、68.75%和50%。从Nazari等^[14-15]的试验可以发现,掺量以4%为宜。然而本文的试验结果以2%为宜,Madandoust等^[13]的试验结果以3%为宜。究其原因主要是水胶比、胶凝材料的含量和组成以及拌合物的流动性不同,Madandoust^[13]的试验中掺入粉煤灰和纳米CuO,其细度大小为纳米CuO>粉煤灰>水泥,故而发生一种微集料效应。通常水胶比较大时,水泥基材料的孔径尺寸相对较大、孔隙率相对较高;低水胶比时,水泥基材料的孔径尺寸相对较小、孔隙率相对较低^[18]。本文的水胶比为0.25和0.35相对于Nazari等^[14-15]试验中的水灰比要小,

因此,纳米CuO的填充作用有所不同。综合上述的研究表明,适量的纳米CuO替代水泥后,能够增强水泥基材料的抗折、抗压强度。

3.3 干燥收缩

图7为纳米CuO对水泥基材料干燥收缩的影响规律。由图7可见,纳米CuO掺量越高,水泥基材料的干燥收缩越小,均低于空白组的干燥收缩。在各掺量下,水泥基材料的干燥收缩基本呈对数变化规律,水胶比为0.35时拟合曲线的 R^2 基本在0.94以上;水胶比为0.25时拟合曲线的 R^2 基本在0.97以上。1%、2%、4%纳米CuO等质量替代水泥后,水胶比为0.35时水泥基材料1d时的干燥收缩比空白组降低了61.5%、76.9%和88.5%;28d时降低了22.0%、29.3%和34.1%。水胶比为0.25时,1%、2%、4%纳米CuO等质量替代水泥后,水泥基材料1d时的干燥收缩比空白组降低了47.9%、50.7%和58.6%;28d时降低了6.7%、11.5%和13.9%。可见,纳米CuO替代水泥后能降低水泥基材料早期的干燥收缩,尤其是水胶比较大时较为显著,而对低水胶比水泥基材料后期的干燥收缩相对较小。这主要是由于纳米CuO颗粒极细,比表面积大,吸湿性强等特点,故而能将拌合用水吸附在水泥基材料内部^[19],当水泥基材料表层的水分散失后,纳米CuO颗粒吸附的水分能够及时补充,进而减小水泥基材料的干燥收缩。综合纳米CuO对水泥基材料凝结时间和流动性的改性作用发现,纳米CuO能在水泥基材料中发挥尺寸效应,进而降低水泥基材料的凝结时间、流动性及干燥收缩性能。

3.4 渗透系数

图8为纳米CuO掺量对水泥基材料渗透性的影响。如图8所示,纳米CuO掺量越大,水泥基材料的渗透系数越小,以掺量为4%时达到最低。纳米CuO的掺量为1%~4%且养护28d时,水胶比为0.35时水泥基材料的渗透系数分别降低了19.7%、28.0%和35.7%;水胶比为0.25时水泥基材料的渗透系数分别降低了44.1%、20.7%和18.8%。对比发现,低水胶比(0.25)时,1%纳米CuO对水泥基材料渗透系数降低幅度的影响较大;高水胶比(0.35)时,4%纳米CuO对水泥基材料渗透系数降低幅度的影响较大,这说明了纳米CuO替代水泥后能达到细化孔结构的目的。许多研究也发现,水泥基材料的渗透性能与孔径分布有关,孔径主要有大害孔(大于200nm)、有害孔(50~200nm)、少害孔(20~50nm)和无害孔(小于20nm)。水胶比较大时,水泥基材料的尺寸较大、孔

隙率相对较高;低水胶比时,水泥基材料的尺寸较小、孔隙率相对较低,因此,在不同水胶比的水泥基材料中,纳米 CuO 的细化作用不同。Nazari 等^[14-15]研究发现,1%~5% 纳米 CuO 替代水泥后,水胶比为 0.40 时自密实混凝土的孔隙率降低了 9.2%、13.25%、

16.04%、18.82% 和 17.57%,其中掺量以 4% 为宜。这与本文渗透性能的结果类似,即掺量以 4% 时水泥基材料的渗透系数最小,这也进一步说明纳米 CuO 能改善水泥基材料的孔结构,在水泥基材料中起着微集料填充作用。

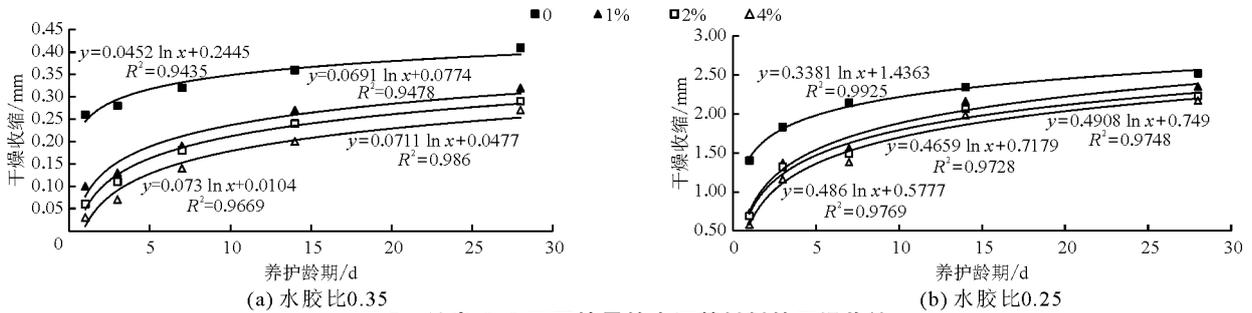


图 7 纳米 CuO 不同掺量的水泥基材料的干燥收缩

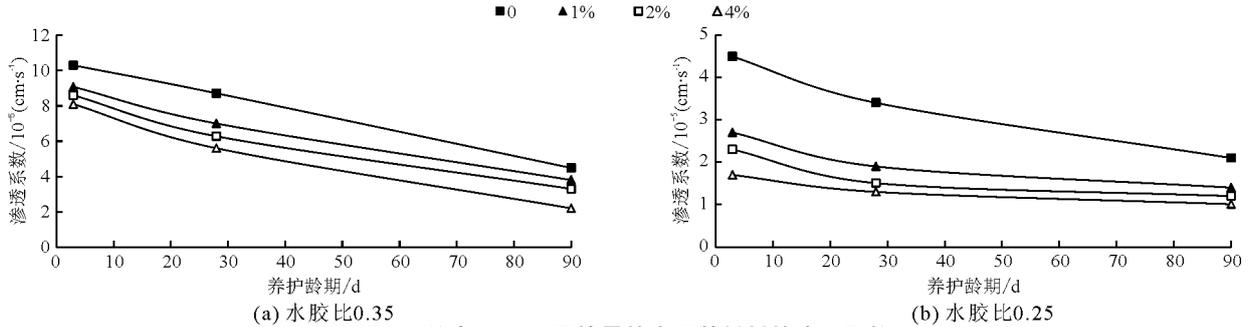


图 8 纳米 CuO 不同掺量的水泥基材料的渗透系数

3.5 微观形貌

图 9 是水胶比为 0.25 时水泥基材料的微观形貌。纯水泥在水化后,其水化产物主要有水化硅酸钙、水化铝酸钙、氢氧化钙和孔隙等。如图 9(a) 所示,空白组中孔隙相对较大,还有一定数量的无害孔。纳米 CuO 掺量为 1% 时,其孔隙相对较小(如图 9(b) 所示),仅有一定数量的少害孔和无害孔,另外,电镜扫描图片中明显出现层状的氢氧化钙以及相互交织在一起的水化硅酸钙。纳米 CuO 掺量为 2% 时,水泥基材料中的孔隙相对较少,未出现层状氢氧化钙,但出现相互交织在一起的高硅钙比水化硅酸钙(如图 9(c) 所示)。Madandoust 等^[13]研究也

发现,纳米 CuO 替代水泥后,自密实混凝土中水化硅酸钙的数量增多,氢氧化钙的数量减少。这主要是纳米 CuO 替代水泥,分散了水泥颗粒,增大了与水的接触概率,进而促进了水泥水化的速率,形成较多的水化硅酸钙。纳米 CuO 与纳米 Al₂O₃ 不同,纳米 Al₂O₃ 活性相对较高,能消耗水泥水化形成的氢氧化钙,进而形成 CAH 或 AFt,故而使水泥基材料的微观结构变得相对密实^[20]。综合上述的研究发现,纳米 CuO 虽不能参与水泥的二次水化反应,但能促进水泥的快速水化,进而发挥纳米材料的表面活性,达到提高水泥基材料的抗折、抗压性能、减小干燥收缩和降低渗透性能。

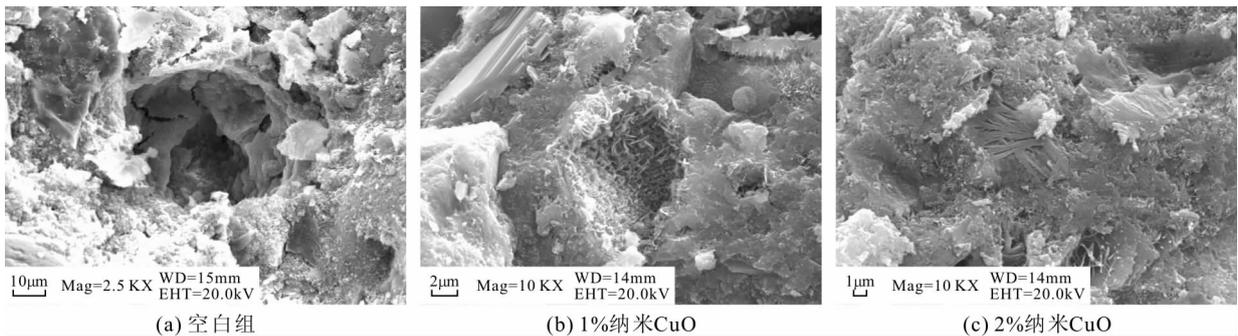


图 9 水胶比为 0.25 时纳米 CuO 不同掺量的水泥基材料的微观形貌

4 结 论

(1) 0.5% ~ 4.0% 纳米 CuO 能降低水泥基材料的凝结时间和流动性, 初凝时间和终凝时间分别缩短了 2.5% ~ 18.0% 和 5.9% ~ 22.9%; 流动性在水胶比为 0.35 和 0.25 时分别降低了 10.5% ~ 31.4% 和 4.3% ~ 14.9%。说明纳米 CuO 能在水泥基材料中发挥尺寸效应, 掺量越大, 凝结时间和和易性的降低幅度越大。

(2) 1% ~ 4.0% 纳米 CuO 能提高水泥基材料的抗折、抗压强度, 降低其渗透性和干燥收缩性能。说明纳米 CuO 能在水泥基材料中发挥微集料的填充效应, 提高其密实度, 达到细化水泥基材料孔结构的目的。

(3) 纳米 CuO 不能参与水泥的二次水化, 但能促进水泥的充分水化。说明纳米 CuO 能在水泥基材料中发挥表面活性效应, 促进水泥的水化, 进而形成较多的水化产物。

参考文献:

- [1] 刘加平, 穆松, 蔡景顺, 等. 水泥水化响应纳米材料的制备及性能评价[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 181 - 187.
- [2] 吴福飞, 董双快, 赵振华, 等. 水泥种类对砂浆收缩性能和孔结构参数的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 207 - 301.
- [3] HEIKAL M, ISMAIL M N, IBRAHIM N S. Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al₂O₃ nano-particles[J]. Construction and Building Materials, 2015, 91: 232 - 242.
- [4] KHOSHAKHLAGH A, NAZARI A, GHOLAMREZA K. Effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(1): 73 - 82.
- [5] RIAHI S, NAZARI A. Physical, mechanical and thermal properties of concrete in different curing media containing ZnO₂ nanoparticles[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8): 1977 - 1984.
- [6] ZHANG Rui, CHENG Xin, HOU Pengkun, et al. Influences of nano-TiO₂ on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage[J]. Construction and Building Materials, 2015(81): 35 - 41.
- [7] RASHAD A M. Effects of ZnO₂, ZrO₂, Cu₂O₃, CuO, CaCO₃, SF, FA, cement and geothermal silica waste nanoparticles on properties of cementitious materials - A short guide for Civil Engineer[J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(11): 1120 - 1133.
- [8] QING Ye, YU Kaikai, ZHANG Zenan. Expansion of ordinary Portland cement paste varied with nano-MgO[J]. Construction and Building Materials, 2015(78): 189 - 193.
- [9] 吴福飞, 董双快, 邓洪刚, 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.
- [10] NAZARI A, RIAHI S. Effects of Al₂O₃ nanoparticles on properties of self compacting concrete with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as binder[J]. Science China, 2011, 54(9): 2327 - 2338.
- [11] NAZARI A, RIAHI S. Mechanical properties of cement mortar with Al₂O₃ nanoparticles[J]. Journal of American Science, 2010, 6(4): 94 - 97.
- [12] AREFI M R, JAVERI M R, MOLLAHMADI E. To study the effect of adding Al₂O₃ nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of cement mortar[J]. Life Science Journal, 2011, 8(4): 613 - 617.
- [13] MADANDOUST R, MOHSENI E, MOUSAVI S Y, et al. An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO[J]. Construction and Building Materials, 2015(86): 44 - 50.
- [14] NAZARI A H, RIAHI S. Effects of CuO nanoparticles on microstructure, physical, mechanical and thermal properties of self-compacting cementitious composites[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(1): 81 - 92.
- [15] NAZARI A, RIAHI S. Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete[J]. Sadhana, 2011, 36(3): 371.
- [16] ASTM C642. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete[S]. Philadelphia (PA): ASTM, 2001.
- [17] SHEKARI A H, RAZZAGHI M S. Influence of nanoparticles on durability and mechanical properties of high performance concrete[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 3036 - 3041.
- [18] 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.
- [19] 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[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(5): 42 - 47 + 53.
- [20] BARBHUIYA S, MUKHERJEE S, NIKRAZ H. Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52(15): 189 - 193.