

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.04.011

聚合物接枝纳米 SiO₂ 的制备及其 对水泥基材料性能的影响

沃建港¹, 王文平¹, 周正发¹, 王帝²

(1. 合肥工业大学 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽建筑大学 材料与化学工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章采用偶联剂 KH550 改性后的纳米 SiO₂ 与丙烯酸甲酯(MA)、乙二胺(EDA)进行反应,再将甲氧基聚乙二醇-丙烯酸酯(MPEG-DA)接枝在经过 MA 和 EDA 扩链处理后的纳米 SiO₂ 表面。采用傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)和热失重分析仪(thermogravimetric analyzer, TGA)对 MPEG-DA 改性的纳米 SiO₂ 的结构进行表征,并分析掺杂纳米 SiO₂ 和 MPEG-DA 改性纳米 SiO₂ 水泥浆体的水化过程、微观结构以及孔径分布。结果表明:MPEG-DA 改性纳米 SiO₂ 可以调控水泥浆体水化过程、精炼水泥试件的微观结构,抑制水泥试件的孔隙率的增加;MPEG-DA 改性纳米 SiO₂ 不仅能优化水泥基材料的施工性能,还可以显著强化水泥基材料的力学强度;在 MPEG-DA 改性纳米 SiO₂ 的掺量为胶凝材料质量的 0.5% 时,砂浆和混凝土 28 d 的抗压强度较空白样增长了 43.1% 和 27.8%。

关键词:水泥基材料;纳米二氧化硅;水化;流动性;抗压强度

中图分类号:TB324;TQ317.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)04-0511-06

Synthesis of polymer decorated nano-SiO₂ and its effects on cement-based materials

WO Jianguang¹, WANG Wenping¹, ZHOU Zhengfa¹, WANG Di²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: On the base of nano-SiO₂ modified by KH550, the surface of nano-SiO₂ was treated with methyl acrylate(MA) and ethylenediamine(EDA) for chain extension, and then methoxy polyethylene glycol diacrylate(MPEG-DA) was anchored onto the nano-SiO₂ surface. The specific structure of MPEG-DA modified nano-SiO₂ was characterized by Fourier transform infrared spectrometer(FTIR) and thermogravimetric analyzer(TGA). The hydration process, electron microscopic patterns and pore size distribution of cement pastes doped with nano-SiO₂ and MPEG-DA modified nano-SiO₂ were analyzed. The results show that MPEG-DA modified nano-SiO₂ can control cement paste hydration process, refine the microstructure and decrease the porosity of cementitious material. Besides, the nano-SiO₂ modified by MPEG-DA not only can optimize the workability of cement-based materials, but also can enhance their mechanical strength. When the content of MPEG-DA modified nano-SiO₂ was 0.5% of cementitious material, the compressive strength of fabricated cement mortar and concrete increased by 43.1% and 27.8%, respectively, compared to the reference sample after curing for 28 days.

Key words: cement-based materials; nano-SiO₂; hydration; fluidity; compressive strength

收稿日期:2023-04-20;修回日期:2024-05-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52003004)

作者简介:沃建港(1997—),男,江苏宿迁人,合肥工业大学硕士生;

王文平(1965—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

周正发(1968—),男,安徽贵池人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: zhengfazhou@hfut.edu.cn.

水泥基材料硬化过程中,内部产生的微裂纹和孔隙会损坏其力学性能。矿粉、硅粉、粉煤灰等辅助胶凝材料常被用来填充粗骨料与水泥颗粒间的空隙^[1]。然而,与水泥胶凝材料相比,上述材料的火山灰反应活性较弱,会对水泥早期水化反应造成阻碍。纳米二氧化硅(NS)具备较强的火山活性,同时兼具纳米材料独特的填充作用,被认为是一种弥补水泥早期水化反应损失的有效加速剂^[2]。NS可以与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,形成更多的C-S-H凝胶,使得水泥基材料具有致密的结构和较低的孔隙率^[3]。然而,NS具有亲水疏油性,极易团聚,会对水泥基材料的施工性能、流变行为以及力学强度造成消极影响^[4-5]。由于大多数表面活性剂与NS之间的相互作用力较弱,一般的物理共混改性不能有效地解决其在水泥基材料中出现的二次团聚^[6]。有研究表明,在NS表面接枝水溶性聚合物可以在水泥基材料中产生协同效应,使其具有良好的分散稳定性、极佳的力学性能以及优越的施工性能^[7-8]。

为了解决NS团聚现象对水泥基材料施工性能造成的消极影响以及强化NS与胶凝材料间的界面作用力等问题,本研究在NS表面接枝了一种水溶性聚合物甲氧基聚乙二醇-丙烯酸酯(MPEG-DA),从而改善NS在水泥基体材料中的相容性,充分发挥NS对水泥基材料力学强度的增强作用。NS表面的大分子聚合物可以提供大的空间位阻效应以避免 SiO_2 在水泥基材料中出现的二次团聚,而且能优化水泥基材料的施工性能,使得NS充分发挥火山灰活性、晶核作用以及纳米填充效应,从而抑制基体材料内部孔隙率和微细裂纹的增加,提高水泥基材料的力学强度。

1 材料与试剂

1.1 材料

乙二胺(EDA)、丙烯酸甲酯(MA)、氯化锂、甲醇、甲苯和二甲基亚砷均购于源叶生物科技有限公司;偶联剂KH550、MPEG-DA和NS均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 材料的合成与制备

1.2.1 KH550接枝纳米二氧化硅的制备

将4 g NS加入100 mL甲苯中超声15 min,氮气氛围下,将8 g KH550加入到上述悬浮液中,升温至105 ℃,搅拌20 h;冷却至室温后离心,乙醇洗涤,干燥备用,即为偶联剂KH550改性纳米二氧化硅(NS-KH550)。

1.2.2 NS表面扩链处理

将产物NS-KH550加入到100 mL甲醇中超声15 min,加入0.8 g MA,升温至50 ℃,搅拌反应12 h;随后加入1 g EDA,继续搅拌相同时间,离心,甲醇洗涤,干燥备用,产物为MA、EDA接枝改性纳米二氧化硅(NS-KH550-MA-EDA)。

1.2.3 MPEG-DA改性纳米二氧化硅

将上述产物加入到100 mL二甲基亚砷中,搅拌15 min,温度调至75 ℃,加入6.5 g MPEG-DA、0.1 g氯化锂,搅拌24 h后,离心后用乙醇冲洗,60 ℃烘干后得产物MPEG-DA改性纳米二氧化硅(NS-MPEG)。

1.3 材料的表征与性能测试

1.3.1 材料的表征

采用Bruker VECTOR-22型傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)和Diamond TG Perkin Elmer型热失重分析仪(thermogravimetric analyzer, TGA)分析NS-MPEG的化学成分组成;通过Regulus 823型高分辨场扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察掺杂NS和NS-MPEG水泥浆体水化3 d后表面的形貌,加速电压20 kV;采用TAM Air型等微量热仪测试掺杂NS和NS-MPEG新鲜水泥浆体的水化过程;采用AutoPore Iv 9510型全自动压汞仪测量掺杂NS和NS-MPEG水泥浆体水化3 d后的孔径分布,在测试前,将待测水泥试件样品浸泡在乙醇溶液中,其水化反应被终止后,烘干备用。

1.3.2 水泥净浆和胶砂流动度测试

按照GB 8077—2000《混凝土外加剂实匀质性试验方法》^[9]测定掺杂NS和NS-MPEG水泥浆的流动度,NS和NS-MPEG掺量为胶凝材料质量的0.25%、0.50%、1.00%,水灰比0.29。水泥胶砂流动度测试中,胶砂比为0.5,水胶比为0.45,实验中外加剂的掺量为胶凝材料质量的0.3%^[9]。

1.3.3 水泥砂浆和混凝土的强度测试

水泥胶砂的7、28 d抗压和抗折强度根据GB/T 50080—2016进行测试^[10]。实验中水灰比0.45,棱柱形试件尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,胶凝材料与NS或NS-MPEG的质量总和为3 000 g,外加剂的掺量为6.075 g。混凝土的7、28 d抗压强度根据GB/T 50080—2016检测^[10],试件为150 mm×150 mm×150 mm的标准样,混凝土中的矿粉、小石、大石、水、砂的质量

分别为 0.8、4.3、6.3、1.3、7.9 kg,其他成分水泥、NS、NS-MPEG 的配比见表 1 所列。

表 1 混凝土中水泥、NS、NS-MPEG 的质量配比 单位:g

试样号	1	2	3	4	5	6	7
水泥	3 000.0	2 992.5	2 985.0	2 970.0	2 992.5	2 985.0	2 970.0
NS	0	0	0	0	7.5	15.0	30.0
NS-MPEG	0	7.5	15.0	30.0	0	0	0

2 结果与分析

2.1 FTIR 谱图分析

合成 NS-MPEG 过程中各产物的 FTIR 谱图如图 1 所示。

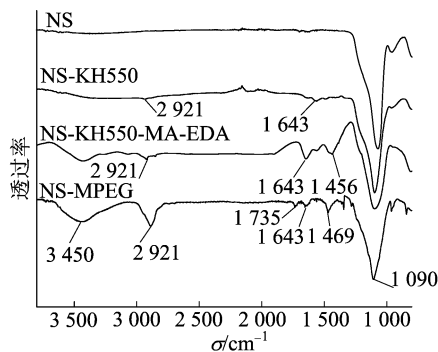


图 1 合成 NS-MPEG 过程中产物的 FTIR 谱图

从图 1 可以看出:Si—O—Si 的弯曲振动峰在 1 090 cm⁻¹处,1 643 cm⁻¹处为氨基 N—H 的吸收峰,2 921 cm⁻¹为亚甲基 C—H 的伸缩振动峰,均为 KH550 的特征峰^[11],说明 KH550 成功偶联至纳米 SiO₂ 表面;对于 NS-KH550-MA-EDA,在 2 921、1 643 cm⁻¹处的吸收峰强度明显增强,在 1 456 cm⁻¹处出现了亚甲基 C—H 弯曲振动,说明丙烯酸甲酯(MA)和乙二胺(EDA)在纳米 SiO₂ 表面扩链反应的成功进行^[12];对于 NS-MPEG,其亚甲基 C—H 的弯曲振动峰位置出现了偏移,与 NS-KH550-MA-EDA 谱线相比,1 643 cm⁻¹处 N—H 的吸收峰明显减弱,是 EDA 与 MPEG-DA 发生了迈克尔加成反应所致,此外,2 921 cm⁻¹处 C—H 的吸收峰强度明显增强,是由于 MPEG-DA 长链中富含亚甲基所致,同时,在 1 735 cm⁻¹处出现了酯基 C=O 的伸缩振动峰。结果表明,MPEG-DA 成功接枝到了纳米 SiO₂ 表面。

2.2 热重分析

MPEG-DA 改性纳米 SiO₂ 过程中各产物的

TG 曲线如图 2 所示。

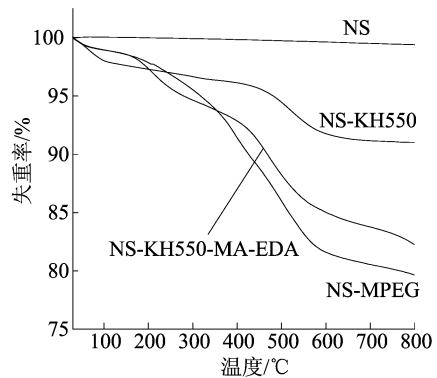


图 2 MPEG-DA 改性纳米 SiO₂ 的 TG 曲线

从图 2 可以看出:在整个热失重过程中,纳米 SiO₂ 的质量并未出现明显波动;偶联剂 KH550 改性后纳米 SiO₂ 的热重曲线在 400~650 °C 区间发生明显下降,是由于偶联剂 KH550 被高温碳化所致,其热失重损失率约为 6%。对比 NS-KH550-MA-EDA 与 NS-KH550 的 TG 曲线可知,两者的质量损失率差约为 12%。分析 NS-MPEG 的 TG 曲线可知,纳米 SiO₂ 表面的总有机物质量分数约为 21%。上述分析进一步证明了一系列有机物成功接枝在纳米 SiO₂ 表面。

2.3 水泥净浆流动度分析

NS 和 NS-MPEG 对水泥净浆流动度的影响如图 3 所示。

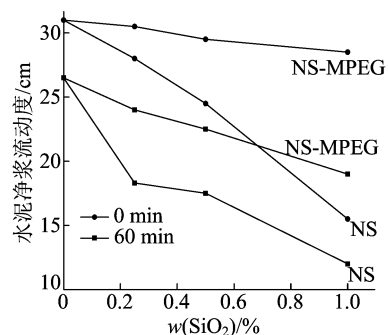


图 3 NS 和 NS-MPEG 对水泥净浆流动度的影响

从图 3 可以看出:加入 NS 后,流动度出现显著降低,这是由于 NS 吸附了体系中外加剂和游离的水分,削弱了外加剂和水分对水泥粒子的分散作用;加入 NS-MPEG 后,较少的掺量(胶凝材料质量的 0.25%)不会降低流动度,并且 60 min 流动度较加入 NS 浆体的流动度明显增加,这是由于 NS-MPEG 表面的 MPEG-DA 大分子提供的空间位阻效应使其稳定分散在水泥颗粒的孔隙

液中, NS-MPEG 的二次团聚现象明显减弱, 同时, 表面接枝的 MPEG-DA 分子也可以起到表面活性剂的作用, 对浆体流动度的提高有一定的优势^[13]; 当 NS-MPEG 掺量过多时, 流动度降低, 这是由 NS 表面的水溶性聚合物不能充分削弱过量的纳米 SiO_2 而造成的大量团聚所致。

2.4 水泥水化程度分析

NS 和 NS-MPEG 在掺量为水泥质量 0.5% 的情况下, 水泥浆体的水化放热速率和累积水化放热量曲线如图 4 所示。

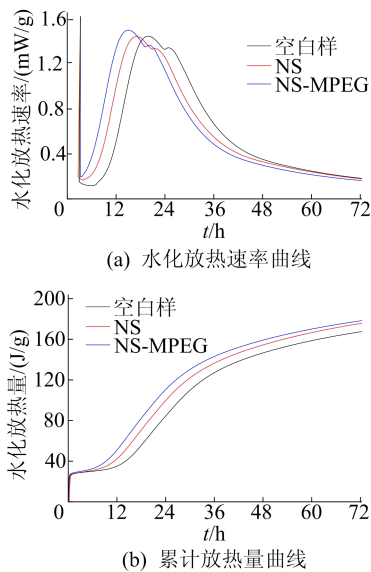


图 4 掺 NS 和 NS-MPEG 水泥的水化放热速率和累计放热量曲线

从图 4a 可以看出, NS-MPEG 和 NS 的加入均能促进 72 h 内水泥水化反应的加速, 并且使水泥水化过程中的第二放热峰提前, 同时 NS-MPEG 对水泥水化放热峰的提前效果以及对水化反应的促进更明显。从图 4b 可以看出, NS 的加入使得水泥水化反应的放热总量增加, 且 NS-MPEG 对放热总量的增加更明显, 这是由于与 NS 相比, NS-MPEG 纳米粒子能通过空间位阻排斥力显著提高其分散稳定性, 有利于纳米粒子晶种效应的激发, 从而促进水泥的水化进程。同时, 均匀分散的 NS-MPEG 可以与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步反应, 生成更多的 C-S-H 凝胶, 使得水泥的水化反应更充分, 因而水泥水化反应放热总量增加。

2.5 硬化水泥试件的微观形貌

加入 NS 和 NS-MPEG 水泥浆体水化 3 d 后的微观形貌如图 5 所示。

由图 5 可知: 掺 NS 水泥浆体硬化水泥试件呈现松散的结构, 并且含有大量的孔隙和微裂纹;

掺 NS-MPEG 水泥浆体试件有大量的水化凝胶, 整个体系呈现交联网状结构。比较图 5a 和图 5b 可知, 掺 NS-MPEG 水泥试件中的微裂纹和孔隙明显减少, 密实度明显增大。这是由于接枝水溶性聚合物 MPEG-DA 的 NS 可以均匀地分散在水泥浆体中, MPEG-DA 提供的大的空间位阻作用力防止了 NS 早期的团聚。在水泥基体中均匀分散的 NS-MPEG 暴露出额外的面积, 为水泥水化过程中的各种水化产物的析出提供了充分的初始成核点。同时, 分散在整个体系的 NS-MPEG 可以与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 更加充分地进行二次水化反应, 形成额外的 C-S-H 凝胶, 加速早期的水化进程^[14]。此外 NS-MPEG 表面的聚合物也可以和水泥水化产物之间相互交联, 细化了水化过程中生成的晶粒, 增强了不同水化产物和 NS 的键合力。因此, 整个水泥结构中呈现出较好的均一性。

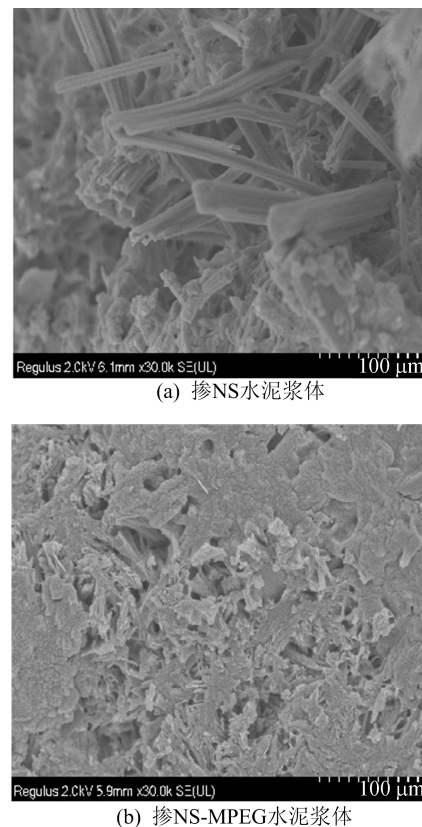


图 5 掺 NS 和 NS-MPEG 水泥浆体水化 3 d 后的 SEM 图

2.6 硬化水泥试件孔隙率分析

掺 NS 和 NS-MPEG 水泥试件以及空白样水化 3 d 后的孔径分布和累计孔径分布如图 6 所示, 平均孔径分布和累计孔隙率见表 2 所列。

从图 6 和表 2 可以看出, 掺入 NS 和 NS-MPEG 的水泥试件孔隙率和孔均分布均明显降

低,而掺入 NS-MPEG 后试件有最小的孔径分布和孔隙率,主要原因是 NS-MPEG 可以调控水泥水化速率,促进水化产物的生成^[15]。

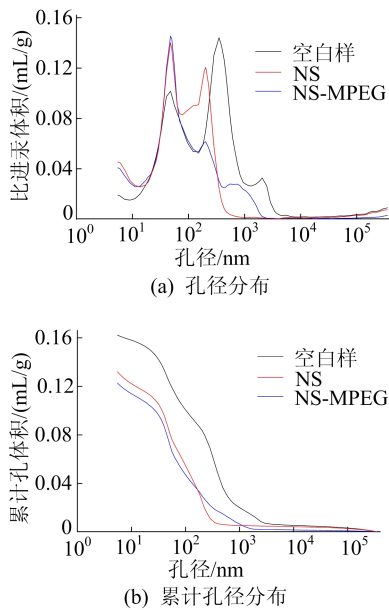


图 6 不同水泥浆体水化 3 d 后的孔径和累计孔径分布

表 2 掺 NS 和 NS-MPEG 水泥试件孔结构的表征参数

水泥试件	平均孔径分布/nm	累计孔隙率/%
空白样	64.74	28.771 6
NS	45.75	25.205 0
NS-MPEG	36.74	22.520 6

此外,具有高分散性的 NS-MPEG 更加均匀地分散在水泥孔隙的碱性溶液中,可以填堵水泥粒子间的空隙,阻碍了微裂纹的进一步产生和发展。同时 NS-MPEG 暴露了更多的面积,与 Ca(OH)₂ 更加充分地发生火山灰反应,促进了水化进程,水泥试件的密实度因而增高。

2.7 砂浆和混凝土流动度及强度试验

NS 和 NS-MPEG 对水泥砂浆、混凝土的流动度和抗压强度影响见表 3 所列。

表 3 NS 和 NS-MPEG 对水泥砂浆和混凝土性能的影响

质量分数/%	流动度/mm	扩展度/mm	混凝土抗压强度/MPa		砂浆抗压强度/MPa		
			7 d	28 d	7 d	28 d	
NS	NS-MPEG						
0	0	355	160	33.57	37.15	37.31	49.03
0.25	0	230	155	35.94	43.32	43.54	53.27
0.50	0	200	145	39.55	41.21	42.66	56.41
1.00	0	180	120	36.54	39.12	42.57	47.57
0	0.25	315	175	37.84	45.48	45.21	68.65
0	0.50	285	170	41.39	47.51	45.84	70.21
0	1.00	265	170	42.33	43.17	46.93	67.31

由表 3 可知,掺杂 NS 导致砂浆流动度和混凝土的塌落度明显变小,但 NS-MPEG 的加入并不会显著降低砂浆和混凝土的流动度,并且混凝土的塌落度呈现变大的趋势。这说明亲水性聚合物 MPEG-DA 增加了 NS 与水泥基材料骨料间的相容性,聚合物提供的空间位阻效应避免了 NS 的团聚现象对水泥基材料工作性能造成的不利影响。添加不同掺量的 NS 和 NS-MPEG 水泥砂浆和混凝土强度在 7、28 d 较空白样均出现了大幅度的增强。其中 NS 替代胶凝材料的质量为 0.50% 时,砂浆 28 d 抗压强度为 56.41 MPa,NS-MPEG 替代胶凝材料的质量为 0.50% 时,砂浆 28 d 抗压的强度增长至 70.21 MPa,分别较空白样强度增加了 15.1%、43.1%。在 NS 和 NS-MPEG 替代胶凝材料质量为 0.50% 时,混凝土 28 d 的强度分别为 41.21、47.51 MPa,较空白样强度增加了 10.9%、27.8%。加入 NS-MPEG 的水泥基材料强度明显增加,是由于 NS-MPEG 可以更充分地促进水泥水化、减少水泥基体材料的孔隙率以及细化水泥基材料的微观结构所致。

3 结 论

本文通过将偶联剂 KH550 接枝到 NS 表面,引入可反应的氨基,经 MA 和 EDA 在其表面扩链,将 MPEG-DA 接枝到 NS 表面得到复合材料 NS-MPEG。NS-MPEG 可以调控水泥的水化过程,细化水泥浆体的微观结构,填堵水泥浆体中的孔隙,提高其密实度。NS-MPEG 不会导致水泥基材料流动度显著降低,在掺量为水泥质量的 0.50% 时,砂浆和混凝土 28 d 的抗压强度分别提高了 43.1%、27.8%。

[参 考 文 献]

[1] WANG M, YAO H. A Novel organic-inorganic hybrid admixture for increasing flowability and reducing viscosity of ultra-high performance paste[J]. Materials, 2020, 13(15): 3385.
 [2] SHIH J Y, CHANG T P, HSIAO T C. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 424(1/2): 266-274.
 [3] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSO M N, et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2291-2298.

(下转第 522 页)

- [13] 赵保路. 电子自旋共振(ESR)技术在生物和医学中的应用[J]. 波谱学杂志, 2010, 27(1): 51-67.
- [14] TEKI Y, MIYAMOTO S, NAKATSUJI M, et al. π -Topology and spin alignment utilizing the excited molecular field; observation of the excited high-spin quartet($S=3/2$) and quintet($S=2$) states on purely organic π -conjugated spin systems[J]. Journal of the American Chemical Society, 2001, 123(2): 294-305.
- [15] ZIED F, WOLFGANG B. Free radical fast photo-cured gate dielectric for top-gate polymer field effect transistors[J]. Organic Electronics, 2012, 13: 1382-1385.
- [16] LU Q, DING M, ZHOU A, et al. Novel alcohol-soluble nitroxide radical conjugated polymer for cathode modifier of efficient organic solar cells with enhanced stability[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(7): 9773-9783.
- [17] NAM H, KWON J E, CHOI M W, et al. Highly sensitive and selective fluorescent probe for ascorbic acid with a broad detection range through dual-quenching and bimodal action of nitronyl-nitroxide[J]. ACS Sensors, 2016, 1(4): 392-398.
- [18] HOWEY D A, ROBERTS S A, VISWANATHAN V, et al. Free radicals; making a case for battery modeling[J]. The Electrochemical Society Interface, 2020, 29(4): 30.
- [19] TANIMOTO R, SUZUKI S, KOZAKI M, et al. Nitronyl nitroxide as a coupling partner; Pd-mediated cross-coupling of (nitronyl nitroxide-2-ido) (triphenylphosphine) gold (I) with aryl halides [J]. Chemistry Letters, 2014, 43(5): 678-680.
- [20] YAMADA K, ZHANG X, TANIMOTO R, et al. Radical metalloids with N-heterocyclic carbene and phenanthroline ligands; synthesis, properties, and cross-coupling reaction of [(nitronyl nitroxide)-2-ido] metal complexes with aryl halides [J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2018, 91(7): 1150-1157.
- [21] SUZUKI S, NAKAMURA F, NAOTA T. A direct synthetic method for (nitronyl nitroxide)-substituted π -electronic compounds via a palladium-catalyzed cross-coupling reaction with a zinc complex [J]. Materials Chemistry Frontiers, 2018, 2(3): 591-596.
- [22] BOOCOCK D G B, DARCY R, ULLMAN E F. Studies of free radicals. II. chemical properties of nitronyl nitroxides, a unique radical anion [J]. Journal of the American Chemical Society, 1968, 90(21): 5945-5946.
- [23] WANG Z Y, DAI Y Z, DING L, et al. A stable triplet-ground-state conjugated diradical based on a diindenopyrazine skeleton [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(9): 4594-4598.
- [24] BREBIS BLEANEY F R S, BOWERS K D. Anomalous paramagnetism of copper acetate [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1952, 214(1119): 451-465.
- [25] CANESCHI A, GATTESCHI D, REY P, et al. Structure and magnetic properties of ferrimagnetic chains formed by manganese (II) and nitronyl nitroxides [J]. Inorganic Chemistry, 1988, 27(10): 1756-1761.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 515 页)

- [4] REN C, HOU L, LI J, et al. Preparation and properties of nanosilica-doped polycarboxylate superplasticizer [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119037.
- [5] GU Y, RAN Q, SHE W, et al. Effects and mechanisms of surface-treatment of cementitious materials with nanoSiO₂@PCE core-shell nanoparticles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 12-22.
- [6] THOMOS J J, JENNINGS H M, CHEN J J. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113(11): 4327-4334.
- [7] MADANI H, BAGHERI A, PARHIZKAR T. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(12): 1563-1570.
- [8] 徐迅, 卢忠远. 纳米 SiO₂ 对硅酸盐水泥水化放热特性的影响 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2007, 29(4): 45-48.
- [9] 国家建筑材料工业局. 混凝土外加剂匀质性试验方法: GB 8077—2000 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 15.
- [10] 中国建筑科学研究院宿迁华夏建设(集团)工程有限公司. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2017: 16.
- [11] 解小玲, 郭睿劼, 贾虎生, 等. KH-550 改性纳米二氧化硅的研究 [J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(1): 26-28.
- [12] TSUBOKAWA N, ICHIOKA H, SATOH T, et al. Grafting of 'dendrimer-like' highly branched polymer onto ultrafine silica surface [J]. Reactive and Functional Polymers, 1998, 37(1/2/3): 75-82.
- [13] 王文平, 江腾飞, 赵怀华. 一种新型抗折调节材料的合成及性能研究 [J]. 现代化工, 2015, 35(8): 118-120.
- [14] ZHANG J, JI Y, MA Z, et al. Strengthening mechanism for the mechanical properties of cement-based materials after internal nano-SiO₂ production [J]. Nanomaterials, 2022, 12(22): 4047.
- [15] GU Y, RAN Q, SHU X, et al. Synthesis of nanoSiO₂@PCE core-shell nanoparticles and its effect on cement hydration at early age [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 673-680.

(责任编辑 闫杏丽)