氧化石墨烯对硫铝酸盐水泥基注浆材料性能影响研究*

赵钰彬，Nathan S.TEAH，刘昶，廖志凌，薛婉文，廖霖

（太原理工大学， 山西 太原 030024）

摘要：探究了氧化石墨烯（GO）对硫铝酸盐水泥基注浆材料性能的影响。通过宏观性能测试发现，随着GO掺量的增加，浆液的流动性降低，但对硫铝酸盐水泥基注浆材料的力学性能有显著提升作用；当GO掺量为0.01%、0.03%、0.05%、0.07%时，与对照组相比，7 d抗压强度分别提高了4.7%、14.1%、13.3%、11.7%，其中，当GO掺量为0.03%时，材料的力学强度提升效果最为显著，表明GO对硫铝酸盐水泥基注浆材料水化反应有显著的促进作用，0.03%为最优掺量。通过微观XRD和SEM分析发现，GO通过桥联作用优化微观结构，虽未生成新产物，但显著提升了硫铝酸盐水泥基注浆材料的稳定性和材料在井下环境中的耐久性。研究表明，GO能够提高硫铝酸盐水泥基材料的早期强度和长期耐久性，对工程应用具有重要价值。

关键词：硫铝酸盐水泥；注浆材料；氧化石墨烯；力学性能；耐久性

中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)07-0234-08

Study on the Influence of Graphene Oxide on the Properties of Sulfoaluminate Cement-Based Grouting Materials

ZHAO Yubin, *Nathan S. TEAH*, *LIU Chang*, *LIAO Zhiling*, *XUE Wanwen*, *LIAO Lin*

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: The influence of graphene oxide (GO) on the properties of sulfoaluminate cement-based grouting materials was investigated. The macroscopic performance tests reveal that with the increase of GO dosage, the fluidity of the slurry decreases, but the mechanical properties of sulfoaluminate cement-based grouting materials are significantly improved. When the GO dosage is 0.01%, 0.03%, 0.05% and 0.07%, compared with the control group, the 7-day compressive strengths are increased by 4.7%, 14.1%, 13.3% and 11.7% respectively. The mechanical strength enhancement effect of the material is the most significant when the GO dosage is 0.03%, indicating that GO has a remarkable promoting effect on the hydration reaction of sulfoaluminate cement-based grouting materials, and 0.03% is the optimal dosage. XRD and SEM analyses reveal that GO optimizes the microstructure through a bridging effect. Although no new products are formed, the stability of sulfoaluminate cement-based grouting materials and their durability in underground environments are significantly enhanced. The study indicates that GO can improve the early strength and long-term durability of sulfoaluminate cement-based materials, which is of great value for engineering applications.

Key words: Sulfoaluminate cement, Grouting material, Graphene oxide, Mechanical property, Durability

0 引言

注浆加固技术作为煤矿巷道围岩支护的重要科学手段，其效果取决于注浆材料的性能[1-3]。1972年，中国建筑材料科学研究院研发出了硫铝酸盐水泥，因其具有快硬早强的特点而被广泛应用。而在煤矿井下高湿度、强通风环境下，基于此开发的硫铝酸盐水泥基注浆材料的力学性能和耐久性面临严峻挑战[4-5]。

许多学者对硫铝酸盐水泥基注浆材料的性能进行了深入研究，并取得了一系列重要成果。孟阳[6]研究了硫铝酸盐水泥-矿渣-石膏胶凝体系的水化硬化与耐久性，结果表明，在硫铝酸盐水泥-矿渣基体中，三元复合体系仍能保持优异的抗硫酸盐侵蚀性能。张松磊[7]针对沙漠砂-氧化石墨烯水泥基材料的力学性能及耐久性展开研究，发现氧化石墨烯（Graphene Oxide, GO）可优化水化过程，降低材料孔隙率，减少有害孔比例，通过形成致密的保护网络

* **收稿日期**：2024-08-09

作者简介：赵钰彬（1998—），男，山西太原人，硕士研究生，主要从事煤矿注浆材料研究。E-mail：729927249@qq.com

有效阻碍了硫酸钠侵蚀路径。刘文娟[8]通过抗冻性能试验发现,当GO掺量为0.06%时,改性混凝土的相对动弹性模量峰值达到94.19%,此时抗冻性能最佳。范春华[9]探讨了GO改性环氧树脂涂层对混凝土抗碳化性能的影响,证实了添加0.3% GO(无论采用何种分散方法)均可显著提高环氧树脂涂层的防护效果。王利军等[10]对GO水泥基注浆材料的流变特性及力学性能进行研究,结果表明,当GO掺量分别为0.03%、0.05%和0.09%时,浆液的屈服应力相较于基准组分别提高了2.9%、12.5%和20.4%,其中,0.03%掺量下结石体的强度增长速率最大。此外,部分学者通过GO-PVA复合注浆材料强度试验发现,GO的片层结构在微观层面上可实现均匀分散,产生纳米级的增强效应,从而显著提升材料的抗压强度[11-14]。微观形貌分析结果进一步表明,适量添加GO能促进硅酸盐水泥水化产物的形成[15-17]。

基于以往的研究成果,本文通过在硫铝酸盐水泥基注浆材料中掺入GO,进一步提升材料的力学性能和耐久性。首先,选取符合试验标准的GO与硫铝酸盐水泥基注浆材料;然后,基于宏观强度试验与微观XRD、SEM试验,系统探究GO掺量对材料宏观力学性能与微观机理的影响规律;最后,确定最优GO掺量。研究结果可为井下破碎煤岩体加固工程中的材料配比与性能优化提供理论指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

硫铝酸盐水泥熟料购自某水泥厂,其化学成分见表1。硬石膏购自某建材厂,其三氧化硫含量为40.1%;生石灰购自某石灰厂,其氧化钙含量为79.81%。

表1 硫铝酸盐水泥熟料化学成分

Table 1 Chemical composition of sulphoaluminate cement clinker %

Fe_2O_3	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	SO_3	损失
2.21	1.45	29.54	45.36	1.94	10.59	8.45	0.46

氧化石墨烯(GO)外观为黑褐色粉末,其主要性能参数见表2。

表2 GO主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of GO

纯度/%	层数	厚度/nm	片层直径/μm	碳含量/%	氧含量/%	硫含量/%	可剥离率/%	比表面积/(m^2/g)
>95	1~2	1	10~50	<48	>42	<2	95	50~100

1.2 测试方法

本试验对浆液的流动度、凝结时间、结石体抗压强度及微观性能(XRD、SEM、TG-DSC、ICP-OES/MS)进行了系统测试。具体测试过程如下[18-20]。

(1) 浆液试样制备。按照试验配比称量A料(硫铝酸盐水泥熟料)、B料(石膏∶石灰=5∶1)、外加剂、氧化石墨烯,固定水灰比为1.0。将干料倒入搅拌机中混合均匀后,加入自来水,搅拌3 min,得到均质的硫铝酸盐水泥基注浆材料浆液。

(2) 流动度测试。参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》,将拌好的浆液注入截锥圆模内,用刮刀刮平,垂直提起截锥圆模,静置30 s,任其在玻璃基板上自由流动,测定浆液在两个垂直方向的最大扩散直径,取平均值作为流动度。

(3) 抗压强度测试。试件由直径为50 mm、高为50 mm的圆柱体试模制作而成。参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》,采用ETM205D-TS微机控制电子万能试验机进行测试,加载速率为0.5 MPa/s,测定材料在不同龄期下的抗压强度。

(4) 微观性能测试(XRD、SEM、ICP-OES)。将不同龄期的试块经破碎、研磨后过200目筛,精确称取0.5 g样品进行测试。

1.3 试验设计

本次试验旨在研究GO掺量对硫铝酸盐水泥基注浆材料的宏观力学性能和微观机理的影响。GO掺量分别取0.01%、0.03%、0.05%、0.07%和0.09%,A料取500 g,B料取500 g,水取1 000 g,外加剂的掺量见表3。此外,设置GO掺量为0%作为对照组。

表3 外加剂掺量

Table 3 Admixture dosage %

柠檬酸	碳酸钠	萘系减水剂	碳酸锂
0.2	2.0	0.4	0.15

2 GO对硫铝酸盐水泥基注浆材料宏观性能的影响

2.1 GO对流动度的影响

测试了不同GO掺量对硫铝酸盐水泥基注浆材料流动度的影响,结果见表4。由表4可知,随着GO掺量的增加,材料流动度呈下降趋势,0 min时分别降低了0.67%、1.35%、1.80%、2.25%、2.70%。尽管GO掺量的变化对材料流动度影响不显著,但整体趋势表明,GO的加入会降低材料的流动性能。这主要归因于GO的比表面积较大,其掺入增强了材料的固水性能,降低了浆液中自由水的含量,导致流动度下降。

表4 GO掺量对流动度的影响

Table 4 Effect of GO content on material fluidity mm

试验号	0 min	20 min	40 min	60 min
对照组	445	304	202	141
GO-1	442	303	201	140
GO-3	439	300	198	138
GO-5	437	297	196	136
GO-7	435	295	195	135
GO-9	433	294	193	131

2.2 GO对抗压强度的影响

不同掺量GO对硫铝酸盐水泥基注浆材料抗压强度的影响结果如图1所示。由图1可知,随着养护龄期的增加,材料的抗压强度逐渐增强。早期阶段(4 h龄期),材料的抗压强度显著提升,波动范围为8.5~10.2 MPa;后期阶段(14 d龄期),材料的抗压强度进一步提高,最高可达20.7 MPa,最低为18.5 MPa,均明显优于对照组。

此外,当GO掺量分别为0.01%、0.03%、0.05%、0.07%时,与对照组相比,材料7 d抗压强度分别增加了4.7%、14.1%、13.3%、11.7%;当GO掺量达到0.09%时,材料抗压强度增长速率降低,与对照组相比,材料7 d、14 d抗压强度仅分别增长了0.8%、2.2%。这主要归因于GO的高活性加速了水化反应,导致钙矾石快速生成,在结石体表面形成微裂隙,从而抑制材料强度发展。

在所有GO掺量中,0.03%掺量组中材料抗压强度的增长速率最为显著。GO掺量大于0.03%时,虽然结石体的强度仍在增加,但增长速率相对减缓。综合考虑GO对材料流动性的影响,认为0.03%掺量的GO效果最佳。

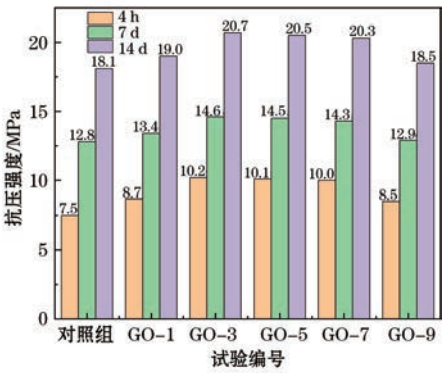


图1 GO掺量对抗压强度的影响

Fig.1 Effect of GO content on compressive strength

3 GO对硫铝酸盐水泥基注浆材料微观机理的影响

3.1 ICP-OEC分析

为了研究GO对硫铝酸盐水泥基注浆材料中钙离子和钠离子浓度的影响,综合考虑其对流动度与抗压强度的影响,最终确定GO的掺量为0.03%。试验测定了对照组和GO-3在1 d和28 d两个养护龄期时溶液中钙离子和钠离子浓度的变化情况,具体试验结果如图2和图3所示。

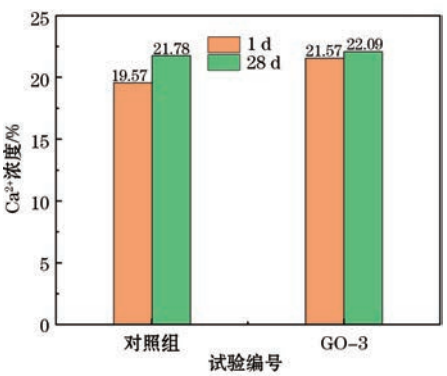


图2 GO对Ca^{2+}浓度的影响

Fig.2 Effect of GO on calcium ion concentration

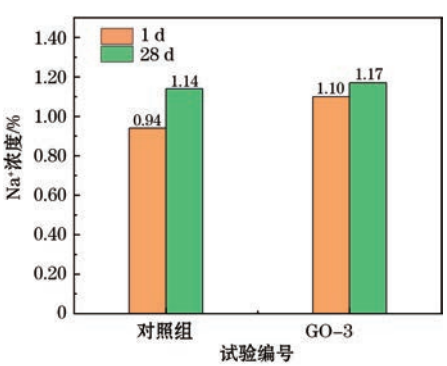


图3 GO对Na^{+}浓度的影响

Fig.3 Effect of GO on sodium ion concentration

由图 2 和图 3 可知,在 1 d 养护龄期下,加入 GO 后,相较于对照组,钙离子浓度增加了 2.00 个百分点,钠离子浓度增加了 0.16 个百分点。而在 28 d 养护龄期下,钙离子浓度增加了 0.31 个百分点,钠离子浓度增加了0.03 个百分点。这些变化的根本原因在于,体系中原有的碳酸钠和碳酸锂等化合物能够促进水化反应,释放出钙离子和钠离子。GO 的加入进一步加速了水化反应进程,导致体系内钙离子和钠离子浓度显著增加。尽管在水化反应后期生成了碳酸钙和氢氧化钙沉淀,但由于 GO 对水化反应的持续促进作用,溶液中依然存在可溶性钙离子和钠离子,使其浓度保持缓慢上升趋势。

3.2 XRD 分析

图 4 和图 5 分别为掺入 GO 后的硫铝酸盐水泥基注浆材料在 1 d 和 28 d 养护龄期下的 XRD 衍射图谱。由图 4 和图 5 可知,掺 GO 试样的钙矾石(AFt)特征峰强度显著增高,其中 GO-3 组中 AFt 生成量明显高于其他试验组。该结果与宏观力学性能分析一致,进一步验证了 GO 的最佳掺量为 0.03%。

硫铝酸盐水泥基注浆材料的水化过程涉及多个阶段的化学反应。首先,无水硫铝酸钙与石膏发生水化反应,生成钙矾石和铝胶,其反应式为:

$$Ca_4Al_6SO_{16}+2(CaSO_4\cdot 2H_2O)+34H_2O\rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O+4AI(OH)_3 \quad (1)$$

接下来,硅酸二钙经过缓慢的水化反应,生成硅酸钙凝胶和氢氧化钙。之后,反应生成的氢氧化钙进一步与体系中的铝胶和石膏反应,形成更多的钙矾石,其反应式为:

$$2Ca_2SiO_4+3H_2O\rightarrow Ca_3Si_2O_5(OH)_4+Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$3Ca(OH)_2+Al(OH)_3+3CaSO_4\cdot 2H_2O+20H_2O\rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O(\text{钙矾石}) \quad (3)$$

GO 的掺入显著提高了早期水化反应的速率。这是由于 GO 具有高比表面积和丰富的活性位点,能够加速水泥基材料中离子的扩散和反应,但并不能生成新的水化产物。GO 主要是加速现有反应过程,提高生成物的数量和分布密度,从而增强材料的早期抗压强度和长期耐久性能。

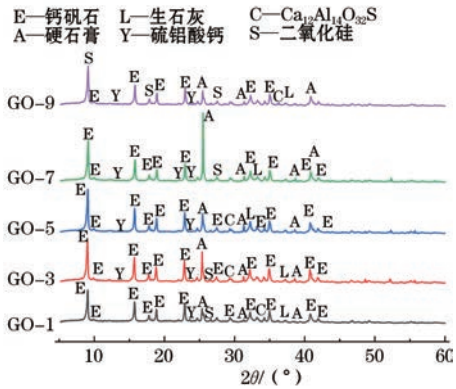


图 4 GO 试验组的 XRD 衍射图谱(1 d 养护龄期)

Fig.4 XRD diffraction pattern of GO test group (1 d curing age)

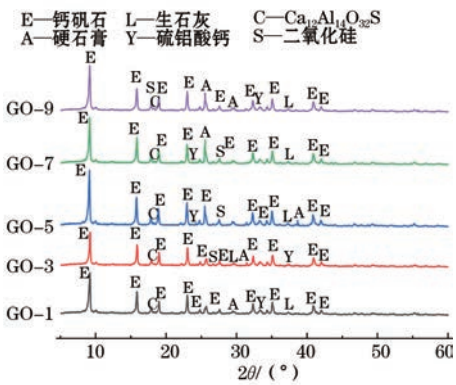


图 5 GO 试验组的 XRD 衍射图谱(28 d 养护龄期)

Fig.5 XRD diffraction pattern of GO test group (28 d curing age)

综上所述,GO 的掺入不仅改变了水泥基材料的水化动力学过程,还对其水化产物的微观结构产生影响。通过 XRD 物相分析与宏观力学性能测试结果的协同分析表明,硫铝酸盐水泥基注浆材料可达到最优的综合性能。

3.3 SEM 分析

为了研究不同掺量 GO 对硫铝酸盐水泥基注浆材料微观结构的影响,本研究采用扫描电子显微镜(SEM)对试样在 1 d 和 28 d 养护龄期下的形貌进行了检测。试验中,分别测试了 GO 掺量为 0.01%、0.03%、0.05%、0.07%、0.09%的样品,并通过对比分析得出了以下主要结论。

当 GO 掺量为 0.01%时(见图 6),1 d 养护龄期试样表面出现大量网状结构堆叠,长针状钙矾石错乱交叉。这种现象的成因是:低掺量的 GO 不足以使浆体的水化反应进行完全,导致生成的 AFt 晶体

数量较少;GO 无法与体系生成新的水化产物,且其比表面积较大,在体系内形成了交错的网状结构,这种结构早期对材料的力学性能有一定的影响。在 28 d 养护龄期时,体系内的水化反应基本完成,钙矾石呈现长条状堆积,同时氢氧化铝凝胶填充在钙矾石的骨架结构中,使得整体结构更加致密,增强了材料的力学性能。

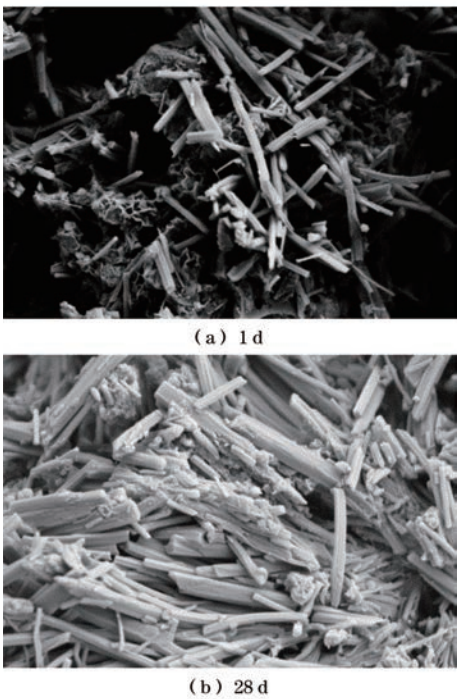


图 6 不同养护龄期 GO-1 的 SEM 图

Fig.6 SEM images of GO-1 at different curing ages

当 GO 掺量为 0.03%时(见图 7),1 d 养护龄期试样的微观结构分析显示体系中有针棒状钙矾石。相比于 GO-1 组,GO-3 组生成的钙矾石密度显著增加,表明水化反应速率得到了提升,这与 XRD 衍射峰中检测到的物相结果相符。在 28 d 养护龄期时,可以观察到大量针棒状钙矾石生成,并紧密堆积。这种密集的针棒状钙矾石结构为材料的后期强度提供了保障,宏观上表现为材料的抗压强度显著增长。当 GO 掺量为 0.03%时,材料表现出了最佳的微观结构和力学性能。

当 GO 掺量为 0.05%时(见图 8),1 d 养护龄期试样的微观结构分析显示体系中生成丰富的钙矾石晶体和氢氧化铝凝胶,以及大量的片状 AFm。然而,网架结构并不密实,水化产物生成也不完全,未能紧密连接。这表明,虽然 GO 促进了水化反应,但掺量过多可能会导致局部过度水化,影响整体结构的均匀性。在 28 d 养护龄期时,随着体系内水化反应的完成,大量放射状钙矾石晶体簇间相互机械咬合构成骨架,整体结构更为致密,从而增加了材料的坚固程度,表现出良好的力学性能。

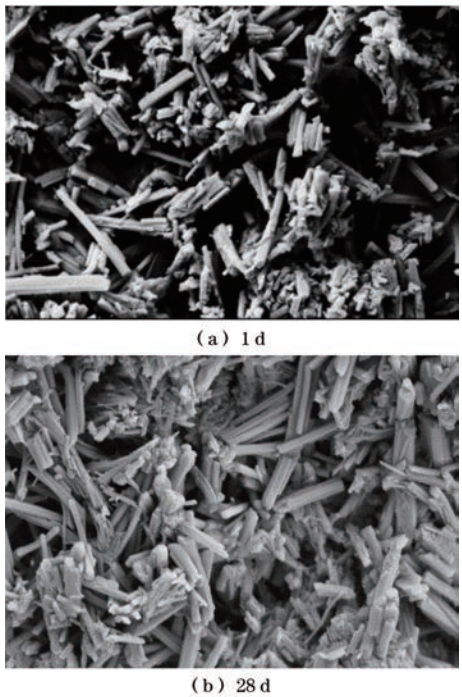


图 7 不同养护龄期 GO-3 的 SEM 图

Fig.7 SEM images of GO-3 at different curing ages

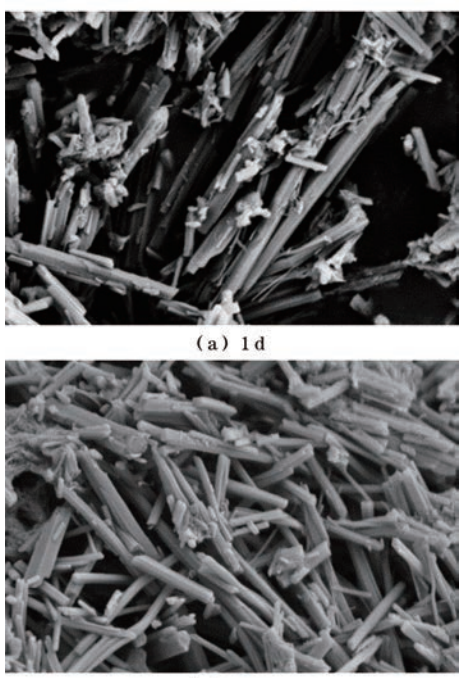
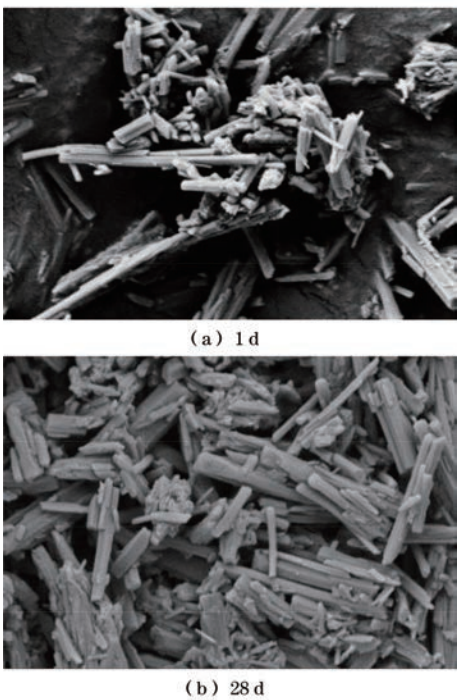


图 8 不同养护龄期 GO-5 的 SEM 图

Fig.8 SEM images of GO-5 at different curing ages

当 GO 掺量为 0.07%时(见图 9),1 d 养护龄期试样的微观结构分析显示体系内有细针状钙矾石生成。这些细针状钙矾石在早期阶段为材料提供了一定的强度支持。在 28 d 养护龄期时,体系内生成大量钙矾石,呈现出机械咬合状态。这种结构为后期强度提供了良好的保障,表现出较高的力学性能和结构稳定性。



(a) 1d

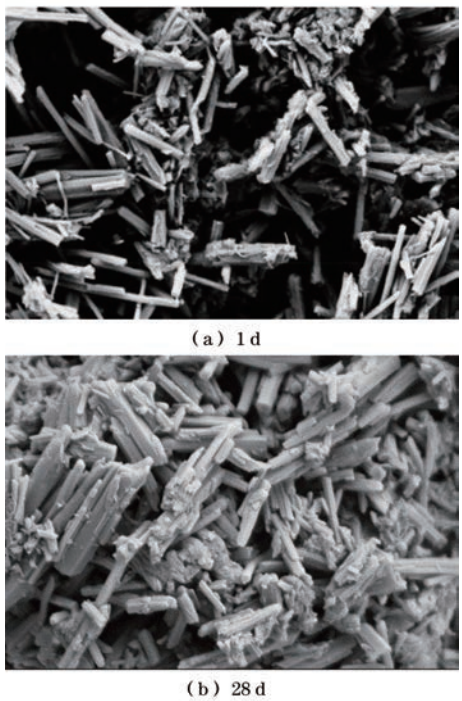
(b) 28d

图 9 不同养护龄期 GO-7 的 SEM 图

Fig.9 SEM images of GO-7 at different curing ages

当 GO 掺量为 0.09%时(见图 10),1 d 养护龄期试样的微观结构显示,过量的 GO 导致水化反应速率较快,水化产物间的裂缝较大,生成的钙矾石未能有效填充和连接这些裂缝,宏观上表现为材料早期强度有所降低。在 28 d 养护龄期时,钙矾石生成量稳定,体系呈现出紧密堆积的结构,后期强度稳定增长。这说明 GO 对硫铝酸盐水泥基注浆材料具有促进和强化其骨架稳定性的作用,并减少了水泥颗粒间的裂缝和缺陷,增强了材料的宏观力学性能。

综上所述,GO 掺量对硫铝酸盐水泥基注浆材料的微观结构和宏观力学性能具有显著调控作用。合理的 GO 掺量能够显著提升材料的强度和稳定性。通过 SEM 分析和力学性能测试,确定 GO 的最佳掺量为 0.03%。



(a) 1d

(b) 28d

图 10 不同养护龄期 GO-9 的 SEM 图

Fig.10 SEM images of GO-9 at different curing ages

4 结论

本试验主要研究了氧化石墨烯(GO)对硫铝酸盐水泥基注浆材料流动性和抗压强度的影响规律,并从微观角度分析了 GO 对该材料性能影响的机理,主要结论如下。

(1) GO 掺量对硫铝酸盐水泥基注浆材料的流动性没有显著影响。尽管在不同 GO 掺量下,浆液的流动度有所变化,但总体影响较小。在加入 5 种不同 GO 掺量时,材料的流动性均满足要求。

(2) GO 掺量对硫铝酸盐水泥基注浆材料的力学性能具有显著影响。随着 GO 掺量的增加,材料的抗压强度显著提高。当 GO 的掺量达到 0.03%时,对材料早期水化反应有明显促进作用,使早期强度显著增长。然而,当 GO 掺量过高时,后期强度会有所下降,因此 GO 的最佳掺量为 0.03%。

(3) GO 的掺入不会改变硫铝酸盐水泥基注浆材料的水化产物。通过 XRD 和 SEM 测试发现,GO 仅促进了水化反应,但不会生成新的水化产物。体系中的主要水化产物仍然是钙矾石、铝胶、硅酸钙凝胶和氢氧化钙等。GO 的桥联效应和纳米填充效应有效填充了水化产物间的微小裂隙,提高了材料

的整体性能。

(4) GO 的掺入对硫铝酸盐水泥基注浆材料的离子浓度有显著影响。未掺入 GO 时,体系中的外加剂会促进水化反应,释放 Ca^{2+} 和 Na^{+}。GO 的掺入加速了这些反应,随着水化反应的进行,体系内 Ca^{2+} 和 Na^{+} 的浓度显著增加,说明 GO 的存在加快了水化反应的速度。

参考文献(References):

[1] 薛浩东,刘伟,侯泽彪,等.过空巷硫铝酸盐水泥基柔模泵送材料的制备研究[J].矿业研究与开发,2021,41(11):118-123.
XUE Haodong, LIU Wei, HOU Zebiao, et al. Preparation study on sulphoaluminate cement-based flexible mould pumping material in pass-through roadway [J]. Mining Research and Development,2021,41(11):118-123.

[2] 蔡兵团.超细硫铝酸盐水泥基注浆材料的应用研究[D].焦作:河南理工大学,2011.
CAI Bingtuan. The application of superfine sulphoaluminate cement-based grouting material [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University,2011.

[3] 方明星.矿用双液硫铝酸盐水泥基注浆材料性能研究与应用[D].焦作:河南理工大学,2012.
FANG Mingxing. The research and application of property for double liquid sulphoaluminate cement-based grouting material in mine [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University,2012.

[4] 牛建东.水泥复合速凝早强剂的试验研究与应用[D].长沙:中南大学,2002.
NIU Jiandong. Experimental research on the complex cement admixtures of the rapid-setting additions and accelerators[D]. Changsha: Central South University,2002.

[5] 冯光明.超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2009.
FENG Guangming. Research on the superhigh-water packing material and filling mining technology and their application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2009.

[6] 孟阳.硫铝酸盐水泥-矿渣-石膏胶凝体系的水化硬化与耐久性研究[D].郑州:郑州大学,2020.
MENG Yang. Study on hydration hardening and durability of sulfoaluminate cement-slag-gypsum cementing system [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2020.

[7] 张松磊.沙漠砂-氧化石墨烯水泥基材料力学及耐久性能研究[D].石河子:石河子大学,2020.
ZHANG Songlei. Study on the mechanics and durability of desert sand-graphene oxide cementitious composites [D]. Shihezi: Shihezi University,2020.

[8] 刘文娟.氧化石墨烯改性混凝土的制备及力学性能和抗冻性能的研究[J].功能材料,2022,53(8):8159-8164.
LIU Wenjuan. Preparation of graphene oxide modified concrete and research on mechanical properties and freezing resistance[J]. Journal of Functional Materials,2022,53(8):8159-8164.

[9] 范春华.氧化石墨烯改性环氧树脂涂层提升混凝土抗碳化性能的研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
FAN Chunhua. Studies on improving carbonation resistance of concrete with graphene oxide modified epoxy resin coating [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2021.

[10] 王利军,朱艺,林本海.氧化石墨烯水泥基注浆材料流变特性及力学性能研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会论文集.北京:中冶建筑研究总院有限公司,2022.
WANG Lijun, ZHU Yi, LIN Benhai. Research on the rheological and mechanical properties of graphene oxide cement-based grouting materials[C]//2022 Symposium on Industrial Architecture. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd. Group,2022.

[11] 郭鑫,李大芳,鲁义,等.GO-PVA 注浆材料的制备及其强度特征研究[J].安全与环境学报,2024,24(10):3827-3838.
GUO Xin, LI Dafang, LU Yi, et al. Preparation of GO-PVA grouting material and its strength characteristics study [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(10): 3827-3838.

[12] 肖凯龙,纪锋,尚志勇,等.冻融循环和硫酸盐侵蚀共同作用下的氧化石墨烯混凝土耐久性研究[J].信息记录材料,2023,24(4):38-40.
XIAO Kailong, JI Feng, SHANG Zhiyong, et al. Durability study of graphene oxide concrete under freeze-thaw cycles and sulfate erosion [J]. Information Recording Materials, 2023,24(4):38-40.

[13] 张瑞君,陈国良,宋春草,等.氧化石墨烯对再生砂超高性能混凝土力学及抗氯离子渗透性能的影响[J].无机盐工业,2024,56(8):54-59.
ZHANG Ruijun, CHEN Guoliang, SONG Chuncao, et al. Effects of graphene oxide on mechanical properties and chloride penetration resistance of ultra-high performance concrete incorporating recycled sand[J]. Inorganic Chemicals Industry,2024,56(8):54-59.

[14] 王雪枫,张旭,王学志,等.氧化石墨烯改性碳纤维水泥基复合材料抗冻性能研究[J].河南科技,2023,42(22):91-95.
WANG Xuefeng, ZHANG Xu, WANG Xuezhi, et al. Freezing resistance of carbon fiber cement-based composites modified by graphene oxide [J]. Henan Science and Technology,2023,42(22):91-95.

[15] 王月,赵思毅,俞佩瑶.氧化石墨烯及其分散方法对水泥基材料微观结构和力学性能的影响研究进展[J].功能材料,2024,55(3):3023-3034.

WANG Yue, ZHAO Siyi, YU Peiyao. Progress in research on the effect of graphene oxide and its dispersion method on the microstructure and mechanical properties of cement-based materials[J]. Journal of Functional Materials,2024,55(3):3023-3034.

[16] 王钰淞,潘明月.氧化石墨烯复合水泥基材料的分子动力学模拟[J].水泥工程,2024,37(1):85-88.
WANG Yusong, PAN Mingyue. Molecular dynamics simulation of graphene oxide composite cement-based materials[J]. Cement Engineering,2024,37(1):85-88.

[17] 董健苗,庄佳桥,赵翠华,等.氧化石墨烯对水泥基材料力学性能的影响及分子动力学模拟[J].桂林理工大学学报,2024,44(3):446-454.
DONG Jianmiao, ZHUANG Jiaqiao, ZHAO Cuihua, et al. Effect of graphene oxide on the mechanical properties of cement-based materials and its molecular dynamics simulation[J]. Journal of Guilin University of Technology,2024,44(3):446-454.

[18] 刘书杰,孙金泽,丁振宇,等.氧化石墨烯改性黏土水泥浆性能试验研究[J].金属矿山,2023(3):59-64.
LIU Shujie, SUN Jinze, DING Zhenyu, et al. Experimental study on performance of graphene oxide modified clay-cement slurry[J]. Metal Mine,2023(3):59-64.

[19] 李少飞,魏智强,乔宏霞,等.纳米氧化石墨烯与聚合物改性水泥基复合材料性能研究进展[J].材料导报,2025,39(10):79-90.
LI Shaofei, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Research progress on properties of polymer cement-based composites modified by nano-graphene oxide[J]. Materials Reports, 2025,39(10):79-90.

[20] 韩雷莹,王学志,辛明,等.氧化石墨烯复掺纤维水泥基复合材料研究综述[J].功能材料,2024,55(3):3073-3082.
HAN Leiying, WANG Xuezhi, XIN Ming, et al. Summary of research on graphene oxide composite fiber material cement-based composites [J]. Journal of Functional Materials,2024,55(3):3073-3082.