

钢渣-水泥复合堵漏材料配比优化及微观结构表征

何智浩^{1,2*}, 廖宇¹, 杨杰³, 张帅³, 李晟³, 刘威⁴, 郝建帅⁵, 高美奔¹

(1. 西华大学应急管理学院, 四川 成都 611930; 2. 四川省重大危险源监测与控制重点实验室, 四川 成都 610046;

3. 中铁二十局集团第四工程有限公司, 山东 青岛 266061; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084;

5. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 为促进工业固废资源化, 开发了一种钢渣-水泥复合堵漏材料, 通过配比优化, 探究其力学特性和水化机制. [方法] 采用 4 因素 3 水平正交试验, 考察不同影响因素对堵漏材料性能的影响, 通过极差分析确定优化配比, 并将优化配比浆液与纯水泥浆液进行不同养护龄期的抗压强度对比, 利用 X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱和扫描电镜对其进行水化产物和微观形貌分析. [结果] 浆液性能受多因素调控, 增大水灰比能延长可泵期和凝结时间, 增加泌水率, 但降低黏度; 减水剂能有效改善浆液流动性, 延长可泵期; 速凝剂是调控凝结时间的第二关键因素; 适量掺入钢渣对各项性能有协同优化作用, 展现出替代部分水泥的潜力. 经优化得到的配比为: 水灰比 0.5、速凝剂掺量 1.5%、减水剂掺量 1.5%、钢渣掺量 16%. 该配比制备的复合堵漏材料综合性能优良, 其 28 d 抗压强度达到 29.78 MPa, 较纯水泥浆液提高了 10.6%. 微观结构分析表明, 材料早期水化程度高, 内部结构致密. [结论] 本研究为钢渣在堵漏工程中的资源化利用提供了新的技术途径, 所开发的环境友好型材料具有良好的工程应用前景.

关键词: 堵漏材料; 正交试验; 配比优化; 水化产物; 微观形貌; 孔隙特征

中图分类号: TV41

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)06-1057-08

Ratio optimization and microstructure characterization of steel slag-cement composite plugging material

HE Zhihao^{1,2*}, LIAO Yu¹, YANG Jie³, ZHANG Shuai³, LI Sheng³,

LIU Wei⁴, HAO Jianshuai⁵, GAO Meiben¹

(1. School of Emergency Management, Xihua University, Chengdu 611930, China; 2. Major Hazard Measurement and Control Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610046, China; 3. The 4th Engineering Limited Corporation Under the 20th Bureau Group of China Railway, Qingdao 266061, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] In this study, to promote the resource utilization of industrial solid waste, we have developed a steel slag-cement composite plugging material, and have explored its mechanical properties and hydration mechanism by optimizing the ratio. [Method] The orthogonal experiment of four factors and three levels was used to investigate the influence of different influencing factors on the performance of plugging materials. The optimal ratio was determined through the range analysis. Then, the compressive strength of optimized proportioned paste was compared with pure cement paste, and its hydration products and microstructure were

收稿日期: 2025-03-31 录用日期: 2025-07-24

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2023K006); 57号改建工程科研项目(HCZB-AL-2024002); 东达山隧道进口高渗透压力水预防排综合施工技术研究; 重大危险源测控四川省重点实验室开放课题(KFKT2023-04); 成都市揭榜挂帅应急类项目(2024-JB00-00006-SN)

*通信作者: hezhiaohao@163.com

引文格式: 何智浩, 廖宇, 杨杰, 等. 钢渣-水泥复合堵漏材料配比优化及微观结构表征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(6): 1057-1064.

Citation: HE Z H, LIAO Y, YANG J, et al. Ratio optimization and microstructure characterization of steel slag-cement composite plugging material[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(6): 1057-1064. (in Chinese)



analyzed using X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy. [Results] The test results show that the slurry performance is controlled by many factors. Increasing the water-cement ratio would prolong the pumpable period and setting time, and increase the bleeding rate, but reduce the viscosity. The water reducing agent can effectively improve the fluidity of the slurry and prolong the pumpable period. Also, the accelerator is the second key factor to control the setting time. Appropriate amount of steel slag exerts a synergistic optimization effect on various properties, showing the potential to replace part of cement. The optimal ratio obtained by optimization includes the water-cement ratio 0.5, the dosage of accelerator 1.5%, the dosage of water reducer 1.5%, and the dosage of steel slag 16%. The composite plugging material prepared by this ratio has excellent comprehensive performance, and its 28 d compressive strength reaches 29.78 MPa, which is 10.6% higher than that of pure cement slurry. Microstructure analysis shows that the synergistic effect of additives accelerates the hydration process of the material, and a large amount of hydration products have been formed by 3 d. As the curing age increases, the structure gradually becomes denser. After 3 to 28 d of curing, the porosity of the material decreases from 41.7% to 34.6%, demonstrating satisfactory compactness. [Conclusion] In this study, a new technical approach for the resource utilization of steel slag in plugging engineering is provided. Furthermore, those developed environmentally friendly materials secure satisfactory engineering application prospects.

Keywords: plugging material; orthogonal experiment; ratio optimization; hydration product; microscopic morphology; pore characteristic

我国隧道工程中的突涌水灾害频发^[1],已成为隧道建设的突出难题^[2].对此,注浆是常见的处置手段^[3-4].目前常见的堵漏材料主要以水泥为主,但是水泥成本高且会产生大量二氧化碳^[5].已有研究采用工业固废镁渣^[6]、碳纤维^[7]、聚丙烯酯^[8]等替代部分水泥成分,调整水泥性能以达到堵漏的效果.Wu等^[9]通过添加纳米硅胶体改善水泥浆液性能,使其在小裂缝岩体中具有良好的流动性和灌浆效果.Sha等^[10]以粉煤灰、硅灰、矿渣制备的高性能微细粒水泥基灌浆液的微观结构致密,孔隙率降低,结构增强,其最佳配比下的浆液具有良好的固结率和稳定性,满足施工需求.由此可见,未来注浆材料主要以绿色环保为主,通过工业固废料再利用,以达到节能减排的目的^[11-12].

钢渣是钢铁生产的主要工业副产品^[13],近几年,全球钢渣年产量已超13亿t,随着固废基充填胶凝材料研究应用的迅速发展^[14],钢渣替代水泥制备的充填胶凝材料可以改善和易性,促进后期水化反应程度,可作为水泥的替代品应用于隧道堵水,具有巨大的市场潜力^[15].Hou等^[16]研究发现钢渣作为胶凝材料时,其水化活性在常温下较弱,经高温高压处理后其水化程度可达硅酸盐水泥的1/3,钢渣含量增加导致体积膨胀,抗压强度先增后降.Sha等^[17]用大量钢渣代替水泥熟料制备钢渣-水泥复合浆液,以固结率、流动性、凝固时间、机械性能、微观结构和孔径分布等为指标优化配比,以满足地下工程注浆要求.Li等^[18]以硫酸钠作为激发剂激发钢渣制作砂浆,以替代硅酸盐水泥,结果显示硫酸钠能激发钢渣砂浆强度使其高于普通硅酸盐水泥.尽管钢渣作为水泥替代材料是可行的,但其较低的水化活性仍是制约其大规模应用的障

碍,需要通过一定的改性才能实际应用,目前仍较缺乏关于钢渣-水泥复合浆液改性的研究.

高细度钢渣可通过增大比表面积和填充效应提升活性,而偏铝酸钠可提供碱性环境和活性铝源,协同激发硅铝相溶解重组,促进水化产物形成,显著增强胶凝性能.因此,本研究采用高细度钢渣并加入偏铝酸钠激发钢渣活性,以制备钢渣-水泥复合堵漏材料,重点考察材料的可泵期、凝结时间、泌水率和黏度等关键性能指标,采用正交试验优化材料配比,并通过力学性能测试和微观结构表征,深入探讨钢渣-水泥复合堵漏材料的水化机制和增强机制,为钢渣资源化利用提供理论依据.

1 实验概况

1.1 原材料

试验所用水泥为都江堰拉法基水泥有限公司生产的P.C 42.5硅酸盐水泥,钢渣为河南铂润铸造材料有限公司生产的比表面积为420 m²/kg的钢渣,两种材料的化学组成如表1所示.外掺剂:偏铝酸钠速凝剂(纯度85%)和聚羧酸减水剂(分子质量8×10³~2×10⁴ u)购自上海臣启化工科技有限公司,聚丙烯酰胺絮凝剂(分子质量5×10⁶ u)购自上海麦克林生化科技有限公司.

1.2 正交试验设计

水灰比作为基础参数直接决定浆液的流动性和最终强度,偏铝酸钠速凝剂可调控凝结时间以满足快速施工需求,聚羧酸减水剂可改善和易性并提高密实度,钢渣的用量可反映其工业固废资源化利用情况.因

表 1 材料的主要化学成分
Tab. 1 Main chemical composition content of materials

材料	质量分数									
	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O
水泥	65.79	4.64	16.77	6.80	1.69	0.09	2.71	0.13	0.72	0.22
钢渣	43.45	27.17	12.47	4.38	4.09	3.73	1.45	1.16	0.96	0.31

此,以水灰比(A)、速凝剂掺量(B)、减水剂掺量(C)、钢渣掺量(D)为影响因素设计正交试验.堵漏材料常用水灰比区间为 0.4~0.6;速凝剂在水泥基材料中的典型掺量范围为 1.2%~1.8%;速凝剂过量(如>2%)可能导致硬化浆体脆性增加、收缩开裂,因此上限设为 1.8%;聚羧酸减水剂的推荐掺量通常为 0.5%~2.0%,其中 1.2%~1.8%是合理优化区间;钢渣根据其活性将掺量控制在 20%以下能确保其性能稳定.基于此,设计的正交试验因素水平如表 2 所示.

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factor levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A	B/%	C/%	D/%
1	0.4	1.2	1.2	0
2	0.5	1.5	1.5	8
3	0.6	1.8	1.8	16

1.3 性能测试方法

实验流程如图 1 所示:首先,根据正交试验配比

(其中固定絮凝剂掺量为 1%)将复合堵漏材料各组分按比例称量后放入搅拌机中充分混合,制备均匀的浆液.随后,对新鲜配置的浆液进行一系列新拌性能测试,包括流动度、泌水率、黏度和凝结时间.同时,采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和压汞法(MIP)进行微观结构分析.完成新拌性能测试后,将浆液注入标准模具中制成标准试件,并测定其不同龄期的抗压强度.

按照《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)^[19]测试水泥浆液的初始流动度和可泵期.

按照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)^[20],采用上海路达试验仪器有限公司生产的维卡仪测定试样的凝结时间.

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[21],采用中国科学院武汉岩土所生产的 RMT-150C 型微机控制电液伺服压力试验机测定试件的抗压强度.

采用奥地利 AntonPaar 公司生产的 MCR102 型智能流变仪,选择同轴圆筒及转子对水泥浆液进行黏度测试,利用 RheoPlus 高级流变软件对实验数据进行分析,得到浆液黏度与时间的关系.

将配制的浆液注入 100 mL 量筒中,每隔 10 min

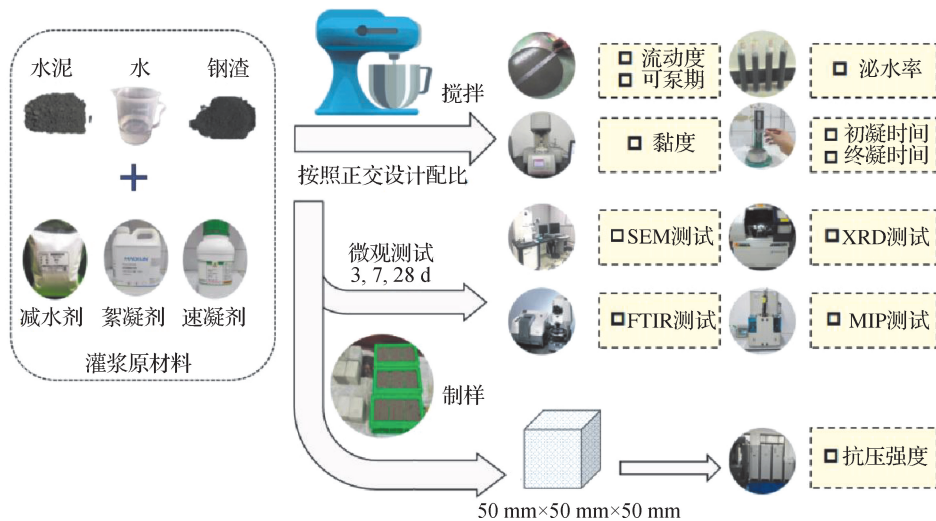


图 1 实验流程图

Fig. 1 Flow chart of experiment

观察并记录量筒中浆液析出水的体积,测定 3 h 内的泌水率。

采用 FEI Quanta-200 型 SEM 观察硬化浆体的微观形貌. 首先将经抗压强度测试后不同龄期试件放入无水乙醇中浸泡 24 h 以终止其水化,然后将其置于 50 °C 干燥箱中烘干,将烘干后的试件切割成小块,用镊子将其放到粘贴好的导电胶上,用洗耳球吹去杂质和灰尘后进行 SEM 检测。

采用 Bruker D8 型 XRD 仪测定样品的 XRD 光谱,采用 Cu K α 射线,测试电压 45 kV,测试电流 40 mA,测试范围(2 θ)5°~70°,采样步长 0.02°,步长时间 0.6 s。

使用 Bruker Vertex 70 型 FTIR 仪测试硬化浆体的硅氧结构,测试范围 600~4 000 cm⁻¹,分辨率 2 cm⁻¹。

利用 Micromeritics 公司的 AutoPore IV 9510 型压汞仪测量样品的孔径分布情况,压力范围 0.003 6~414 MPa。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果分析

通过 4 因素 3 水平正交试验,测定材料的可泵期、初凝时间、终凝时间、泌水率、黏度,结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果
Tab. 3 Results of orthogonal experiment

组别	A	B/%	C/%	D/%	可泵期/min	初凝时间/min	终凝时间/min	泌水率/%	黏度/(mPa·s)
1	0.4	1.2	1.2	0	7	226	314	0.25	5 324
2	0.4	1.5	1.5	8	5	75	102	0	3 161
3	0.4	1.8	1.8	16	13	182	226	0.20	3 061
4	0.5	1.2	1.5	16	40	296	361	0.52	2 531
5	0.5	1.5	1.8	0	24	218	282	0.62	3 640
6	0.5	1.8	1.2	8	15	237	285	0.30	6 859
7	0.6	1.2	1.8	8	131	540	579	1.20	1 732
8	0.6	1.5	1.2	16	22	119	228	0.60	4 100
9	0.6	1.8	1.5	0	117	496	584	0.48	1 411

通过极差分析(表 4)可知:对于可泵期和初凝时间的影响因素主次为水灰比>速凝剂掺量>减水剂掺量>钢渣掺量,对于终凝时间的影响因素主次为水灰比>速凝剂掺量>钢渣掺量>减水剂掺量,对于泌水率的影响因素主次为水灰比>减水剂掺量>速凝剂掺量>钢渣掺量,对于黏度的影响因素主次为减水剂掺量>水灰比>速凝剂掺量>钢渣掺量。

2.1.1 各因素对可泵期的影响

如表 4 所示:随着水灰比和减水剂掺量的增加,可泵期延长. 这是由于水灰比提高增加了自由水含量,降低了颗粒摩擦阻力,改善了浆液流变性;减水剂的吸附分散作用可降低黏度,增强流动性^[22]. 速凝剂掺量增加使可泵期先缩短后延长,这是因为速凝剂在低掺量($\leq 1.5\%$)时快速形成钙矾石骨架促进凝结,使可泵期缩短,但过量($> 1.5\%$)时则会因瞬间生成过多水化产物包裹水泥颗粒,形成致密屏障而抑制后续水化,导致可泵期延长. 钢渣掺量增加导致可泵期先延长后缩短,这是因为适量钢渣掺杂($\leq 8\%$)可优

化级配,改善分散性,但过量时细颗粒堆积增稠,降低流动性。

2.1.2 各因素对凝结时间的影响

如表 4 所示:随着水灰比和减水剂掺量增加,凝结时间(初凝时间和终凝时间)延长;而随着速凝剂掺量增加,凝结时间先缩短后延长;随着钢渣掺量增加,凝结时间缩短. 这是因为:水灰比升高降低了固相浓度,增加了液相比例,延长凝结时间. 速凝剂在低掺量($\leq 1.5\%$)时通过消耗石膏和提高碱度,有效促进铝酸三钙(C₃A)和硅酸盐矿物的水化,显著缩短凝结时间;但高掺量($> 1.5\%$)下石膏会被过度消耗,C₃A 水化产物形态改变,结构形成受阻,且过高的碱度抑制硅酸盐矿物的水化,导致凝结时间延长^[23]. 减水剂通过羧酸基团吸附在水泥颗粒表面,增强分散性,从而延缓凝结. 钢渣的高比表面积与粗糙表面为水化产物提供了丰富的成核位点,通过物理催化作用加速水化进程,从而缩短凝结时间。

表 4 正交试验结果极差分析
Tab. 4 Range analysis of orthogonal test results

参数	可泵期/min				初凝时间/min				终凝时间/min			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	8.3	59.3	14.7	49.3	161.0	354.0	194.0	313.3	214.0	418.0	275.7	393.3
k_2	26.3	17.0	54.0	50.1	250.3	137.3	289.0	291.3	309.3	204.0	349.0	339.8
k_3	90.0	48.3	56.0	25.0	385.0	305.0	313.3	199.0	463.7	365.0	362.3	271.7
R	81.7	42.3	41.3	25.1	224.0	216.7	119.3	114.3	249.7	214.0	86.6	121.6

参数	泌水率/%				黏度/(mPa·s)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	0.15	0.66	0.38	0.45	3 849	3 196	5 428	3 458
k_2	0.48	0.41	0.33	0.49	4 343	3 634	2 368	3 803
k_3	0.76	0.33	0.67	0.44	2 414	3 777	2 811	3 231
R	0.61	0.33	0.34	0.05	1 929	581	3 060	572

注: k_i 表示该因素第*i*水平的平均值,R表示极差,即 k_i ($i=1,2,3$)的最大值和最小值之差。

2.1.3 各因素对泌水率的影响

如表 4 所示,泌水率随着水灰比增加而上升,随着速凝剂掺量增加而下降,随着减水剂掺量增加先略微降低后大幅上升,随着钢渣掺量增加有小幅波动。这是因为:水灰比增大使得颗粒间距扩大,孔隙结构疏松,毛细通道增多促进了自由水析出,导致泌水率上升^[24]。速凝剂可加速水化反应消耗自由水,并且水化放热引起水分蒸发,使得泌水率降低。减水剂通过释放自由水使泌水率上升。钢渣的微粉填充效应仅轻微改善泌水性能,对其影响较小。

2.1.4 各因素对黏度的影响

如表 4 所示:高水灰比(0.6)和减水剂掺量(1.5%)可明显降低浆液黏度,这是因为水分增加扩大颗粒间距,削弱分子间作用力;同时减水剂通过空间位阻效应促进颗粒均匀分散,使黏度先快速下降后小幅回升^[25]。而速凝剂和钢渣掺量对黏度影响较小,前者通过生成微细的钙矾石增加浆液中的固相交缠程度从而提升黏度,后者不规则形状会增加浆液内摩擦力使黏度上升,而继续增加掺量后因钢渣吸水性弱于水泥,降低了整体流动阻力,导致黏度下降。

2.2 优化配比

可泵期过短可能导致泵送困难,过长会延迟凝结,影响快速堵水效果;初凝时间过短易导致堵管风险,过长会影响浆液早期强度形成。因此为满足工程应用,可泵期应控制在 30~40 min,初凝时间应控制在 90~120 min,泌水率不宜大于 1%,黏度在初始阶

段应在 1 000~5 000 mPa·s。结合正交试验综合分析,确定优化配比为水灰比 0.5、速凝剂掺量 1.5%、减水剂掺量 1.5%、钢渣掺量 16%,得到的各项性能指标为:可泵期 35 min、初凝时间 109 min、终凝时间 196 min、泌水率 0.55%、黏度 3 240 mPa·s。

对比纯水泥浆液与优化配比浆液在不同养护龄期下的强度(图 2)可以发现:优化配比浆液的抗压强度明显高于纯水泥浆液,在养护 28 d 后可达到 29.78 MPa;与纯水泥浆液相比,在养护 1,3,7,28 d 后抗压强度分别提升 31.6%,23.6%,19.9%,10.6%。这表明外掺剂与钢渣的协同作用可显著提升水泥浆液早期抗压强度。外掺剂通过降低水化活化能、促进硅酸三钙(C_3S)溶解,加速水化硅酸钙凝胶成核;钢渣则发挥微集料

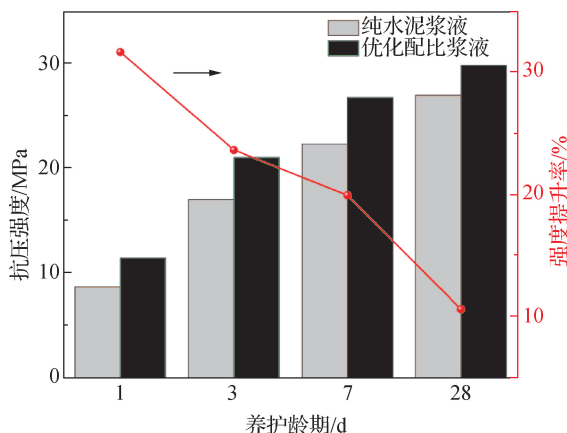


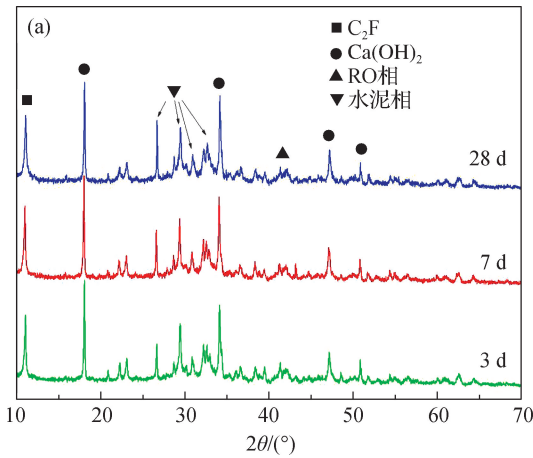
图 2 优化配比浆液与纯水泥浆液的抗压强度
Fig. 2 Compressive strength of the optimized slurry and pure cement slurry

填充效应,降低孔隙率,同时其活性组分在碱性环境下二次水化生成硅酸钙凝胶;此外,钢渣中铁相($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)催化水化反应,促进电子转移.多因素协同作用加速水化进程,从而增强早期强度发展.在实际工程应用中,通过调整外掺剂的种类和掺量,以及钢渣的配比,可以精确控制浆液的凝结时间和强度发展速率,从而满足不同工程场景的需求.

3 优化配比材料的水化产物和微观形貌分析

3.1 水化产物分析

复合堵漏材料在不同养护龄期(3,7,28 d)的XRD谱图如图3(a)所示.可以看出其特征峰对应的水化产物包括铁酸二钙(C_2F)、氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$



以及RO相(主要为钢渣中的固溶体相).不同龄期的水化产物种类并未发生明显变化,表明速凝剂的加入主要加速了体系的水化反应进程,而未改变水化产物种类,使得体系在3 d龄期时已达到较高水化程度.

复合堵漏材料在不同养护龄期(3,7,28 d)的FTIR谱图如图3(b)所示.O—H振动峰从 $3\,520\text{ cm}^{-1}$ (3 d)逐渐移至 $3\,500\text{ cm}^{-1}$ (7 d)和 $3\,430\text{ cm}^{-1}$ (28 d),表明氢键作用增强,体系中的水随着龄期增大逐渐参与化学反应.Si—O振动峰在 968 cm^{-1} 处的强度随龄期增加峰形变得更尖锐,说明硅酸盐结构逐渐形成.此外, $1\,420\text{ cm}^{-1}$ 处的C—O振动峰强度在28 d时达到最大,说明碳化反应持续进行,生成碳酸盐.这些峰的变化表明复合堵漏材料在养护3 d时已形成水化产物,7 d后水化产物逐步增加,至28 d时内部结构趋于稳定.

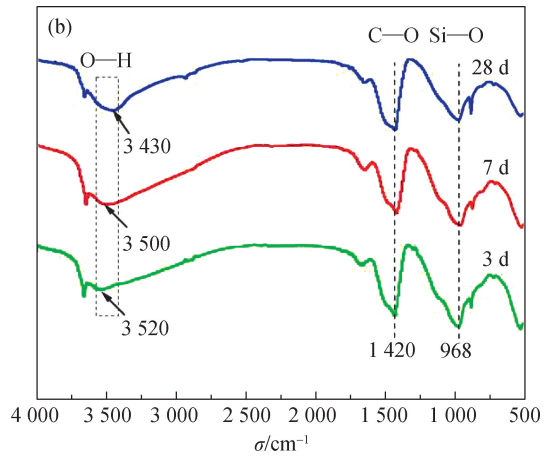


图3 复合堵漏材料在不同养护龄期的XRD(a)和FTIR(b)谱图

Fig. 3 XRD patterns (a) and FTIR spectra (b) of composite plugging material at different curing ages

3.2 微观形貌分析

通过SEM观察复合堵漏材料的微观结构(图4),并探讨其水化过程.

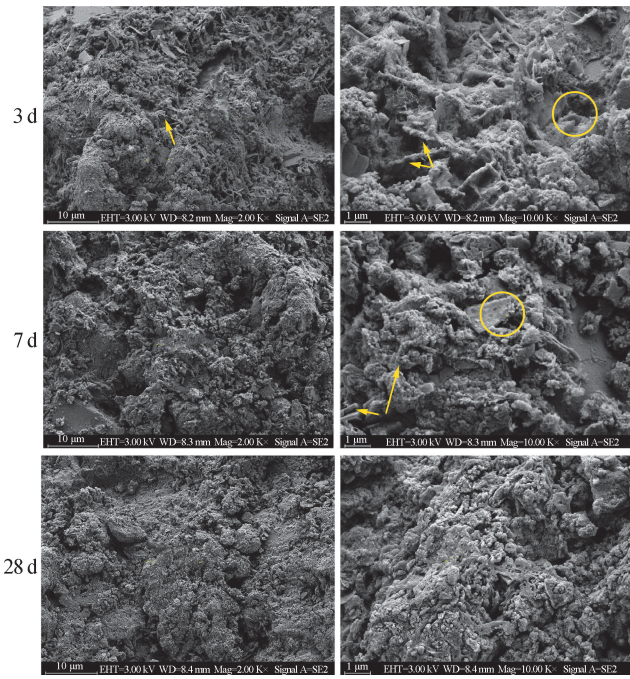
在3 d养护龄期时,其内部生成的水化产物含量较低,颗粒之间形成众多明显且较大的缝隙,但已经明显生成水化产物(如水化硅酸钙凝胶和钙矾石晶粒),这种微米级的颗粒分布特征导致未水化水泥颗粒间形成了“支架式”孔隙结构.其中水化硅酸钙凝胶主要填充较小的毛细孔隙,而钙矾石晶粒则倾向于在较大的孔隙中生长.这种填充作用虽然尚未完全,但改善了材料的微观结构致密性,表明水化反应已经较为充分地进行.

在7 d养护龄期时,随着水化作用的不断深入,体系已完成主要水化反应进程,其水化产物含量逐步上升,生成大量的水化硅酸钙凝胶和钙矾石晶粒,大部

分孔隙被填充,钙矾石晶体经历二次结晶过程,进一步填充孔隙.同时,水化硅酸钙在水泥颗粒表面不断生成并大量扩展,微观结构显得更加紧密.

在28 d养护龄期时,钙矾石晶须在水化产物网络中形成三维贯穿结构,并且与水化硅酸钙凝胶基体产生强机械互锁效应,交织在水泥颗粒表面的水化硅酸钙及其裂缝中.在水化产物的充分填充和孔隙结构的优化作用下,材料表现出高度致密的微观结构.

浆液标准养护3,7,28 d后的MIP测试结果如图5所示.由图5(a)的累积孔隙体积曲线可以看出,孔隙体积随养护龄期呈现递减趋势,在养护3,7,28 d后孔隙率分别为41.7%,40.0%,34.6%,在此期间孔隙率共降低了7.1个百分点,证实了水化产物的不断生成与沉积对孔隙结构的填充效应,反映材料内部结构逐步致密化.



箭头指向钙矾石,圆圈处为水化硅酸钙.

24.4 mL/g, 28 d 时峰面积进一步降至 22.6 mL/g, 进一步说明随着养护龄期的增长,体系内部水化产物逐渐增多,填充在原有孔隙中,导致材料的孔隙率减小.

4 结论与展望

本研究以钢渣和水泥为胶凝材料,与速凝剂、减水剂复配制备复合堵漏材料,得出以下结论:

1) 各因素对浆液性能影响显著.增大水灰比可延长可泵期和凝结时间,增加泌水率,但降低黏度;减水剂能有效改善浆液流动性,延长可泵期;速凝剂是除水灰比外调控凝结时间的关键因素;适量掺入钢渣对各项性能有协同优化作用,展现出替代部分水泥的潜力.

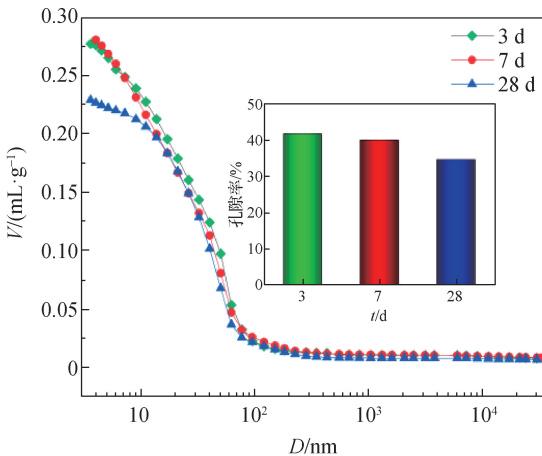
2) 复合堵漏材料的优选配比为水灰比 0.5、速凝剂掺量 1.5%、减水剂掺量 1.5%、钢渣掺量 16%,该配比下制备的复合堵漏材料可泵期为 35 min,初凝时间为 109 min,终凝时间为 196 min,泌水率为 0.55%,黏度为 3 240 mPa · s,在 28 d 养护后抗压强度为 29.78 MPa,较纯水泥浆液提升 10.6%,体现出材料的快凝高强特性.

3) 微观结构表征显示,外掺剂的协同作用使材料水化进程迅速,3 d 时已形成大量的 Ca(OH)₂ 和水化硅酸钙凝胶等水化产物.随着龄期增长,水化产物持续生成,孔隙被不断填充,结构逐渐致密.经 3~28 d 养护后,材料孔隙率由 41.7% 降低至 34.6%,表现出良好的密实性.

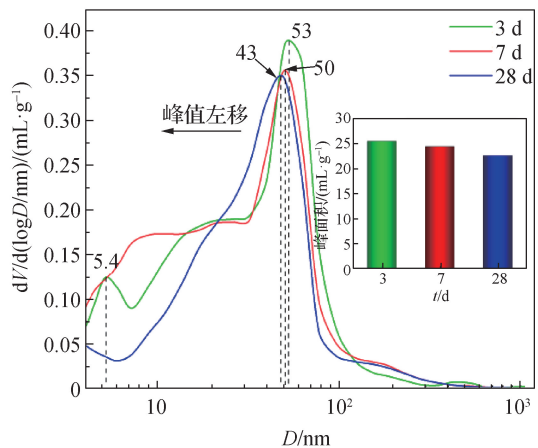
本研究开发的复合堵漏材料不仅能够满足快凝高强的需求,在“双碳”目标背景下规模化应用还将推动固废资源化利用,具有广阔的工程应用前景.后续

图 4 复合堵漏材料在不同养护龄期的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of composite plugging material at different curing ages

不同养护龄期的材料孔隙结构分布特征如图 5 (b) 所示.随着养护龄期的增长,dV/d(logD) 的峰值位置逐渐左移:3 d 时峰值对应的孔隙直径为 53 nm,7 d 时减小至 50 nm,而 28 d 时进一步减小至 43 nm,表明随着养护龄期的增长,孔隙的平均尺寸也逐渐减小.结合 3 d 时峰面积为 25.5 mL/g,7 d 时峰面积降至



(a) 累积孔隙体积变化



(b) 孔隙分布曲线

V 为累积孔隙体积,D 为孔径,dV/d(log D) 为孔体积对孔径分布的频率函数.

图 5 孔隙特征变化

Fig. 5 Variation of pore characteristics

可以重点考察复合堵漏材料在冻融循环、硫酸盐侵蚀等严苛环境下的长期耐久性演变规律。此外,为更好服务于隧道涌突水等应急抢险工程,未来研究应着重考察该材料在动水条件下的封堵效果与抗冲刷性能,并系统评价其与围岩的界面粘结特性,为材料的工程化应用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 唐夺,高成林,朱筱宇. 矿山地质灾害和工程地质水文地质环境问题的预防策略探析[J]. 中国矿业, 2024, 33(增1):120-123.
- [2] XU Z G, ZHANG Z Y, CAO C, et al. Progressive assessment of water inrush disasters in pre-construction and construction phases based on Chinese tunnels research[J]. Carbonates and Evaporites, 2024, 39(2):50.
- [3] 成曦,李建国,杨吉,等. 砂化白云岩隧洞突水涌砂处置方案适宜性评价方法及工程应用[J/OL]. 长江科学院院报, 2025[2025-07-02]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.tv.20250403.1435.002>.
- [4] 翁贤杰,陈海兵,张龙生,等. 富水地层破碎围岩浅埋隧道突水涌泥段大变形处置措施[J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(4):64-70.
- [5] 谢月,韩宇栋,彭博,等. 水泥基灌浆材料制备和基本性能研究评述[J]. 材料导报, 2024, 38(增1):171-181.
- [6] YE J H, LIU S H, ZHAO Y, et al. Development of ultrafine mineral admixture from magnesium slag and sequestration of CO₂[J]. Buildings, 2023, 13(1):204.
- [7] 胡春红,王彦伟,朱昌星. 碳纤维增强聚合物水泥注浆材料力学性能及其微观机理[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1):20-26, 50.
- [8] 吴龙骥,吴志军,翁磊. 聚丙烯酸酯改性水泥注浆材料力学性能与微观结构研究[J]. 力学与实践, 2023, 45(5):999-1009.
- [9] WU Y, QIAO W G, LIU H N, et al. Research on sustainable development of fine-grained material cement slurry[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302:124155.
- [10] SHA F, LIU P, DING Y L. Application investigation of high-phosphorus steel slag in cementitious material and ordinary concrete[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11:2074-2091.
- [11] WU Y, QIAO W G, ZHU Y G, et al. Engineering application of new silica fume environmentally friendly cement slurry[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411:134497.
- [12] 张健,王川,李召峰,等. 赤泥基绿色高性能注浆材料工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增2):3339-3352.
- [13] 肖杰,刘财壮,李嘉杰. 碱激发 CFB 灰-钢渣微粉-脱硫石膏固废注浆材料特性研究[J]. 公路, 2024, 69(4):28-35.
- [14] JIANG B L, WU M J, WU S S, et al. A review on development of industrial solid waste in tunnel grouting materials: feasibility, performance, and prospects [J]. Materials, 2023, 16(21):6848.
- [15] 王倩,赵令,晁乾锋,等. 钢渣协同硅锰渣制备低碳复合胶凝材料及其水化机制[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 2025[2025-07-02]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20250226>.
- [16] HOU J W, LIU J X. Hydration activity and mechanical properties of steel slag used as cementitious materials [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2022, 41(2):e13756.
- [17] SHA F, LI H Y, PAN D, et al. Development of steel slag composite grouts for underground engineering [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3):2793-2809.
- [18] LI X, DOH S I, HO C M, et al. The investigation on properties of sodium sulfate-activated mortar incorporating steel slag with various replacement ratio and particle size [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2022, 128:103241.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥基灌浆材料应用技术规范:GB/T 50448—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [20] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法:GB/T 1346—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [22] 倪涛,裴向军,范明明,等. SJP 水泥改良土浆的基本物理性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8):2637-2641.
- [23] 廖嘉欣,王健,孔祥明,等. 硫酸铝和偏铝酸钠对水泥浆体强度发展的影响机理[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(12):1071-1080.
- [24] 刘伟韬,吴海凤,申建军. 基于 RSM 的超细水泥注浆材料配比及性能优化模型[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8):146-158.
- [25] 杜野,裴向军,黄润秋,等. 黏度时变性注浆材料流动特性与应用研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12):3498-3504.

(责任编辑:曾礼娜)