

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.026



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



隧道喷射混凝土浸出物对工程排水水质的影响规律

罗鹤松¹, 孟凡强¹, 龚勋¹, 李传松², 代劲松², 王东梅¹, 龚正君¹

(1. 西南交通大学 环境科学与工程学院, 成都 611756; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:排水清污分流是减少隧道施工污水排放的重要措施。隧道喷射混凝土在未稳定前的浸出物质会影响排水水质, 研究其稳定过程中浸出物对水质的影响规律对实现清污分流的精准实施具有重要意义。通过静态及动态试验对混凝土浸出物组分及浸出规律进行系统研究, 静态试验结果表明: 与新浇筑混凝土接触后, 水体中碱性物质的大量释放导致水质 pH 值迅速上升, 是影响水质的重要污染因子; 动态试验结果表明: 混凝土养护时间、水固比(L/S)、混凝土与水体的接触面积等均对接触水样的水质有影响。混凝土养护时间小于 3 d 时, 其内部的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体未被 C-S-H 凝胶固化, 容易持续析出, 导致接触水样 pH 值超标; 随着养护时间的增加, 碱性物质的浸出率大幅降低, 当养护时间达 28 d 时, 浸出液的 pH 值降至 9 以下, 可以满足污水综合排放要求。 L/S 较低时, 浸出物质对水样的 pH 值和碱度影响较大, 当 L/S 超过 40:1 时, 浸出物质对水样水质影响不显著。与水样的接触面积越大, 混凝土中的碱性物质更易溶解析出, 对水质的 pH 值和碱度影响更为显著。

关键词:排水; 清污分流; 喷射混凝土; 浸出物质; 隧道施工

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2025)04-0226-08

Influence of leaching substances from tunnel shotcrete on water quality

LUO Hesong¹, MENG Fanqiang¹, GONG Xun¹, LI Chuansong², DAI Jinsong²,
WANG Dongmei¹, GONG Zhengjun¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, P. R. China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Water-sewage diversion of tunnel construction drainage is an important engineering technique to reduce tunnel construction sewage discharge. However, the leaching substances of unstable tunnel shotcrete can affect the drainage water quality. Therefore, the study of the influence of leaching substances on the water quality during the stabilization process of shotcrete is of great significance for the precise implementation of

收稿日期: 2024-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(22176154); 四川省自然科学基金(2022YFS0502)

作者简介: 罗鹤松(1998-), 男, 主要从事水污染控制研究, E-mail: l2365482116@163.com。

王东梅(通信作者), 女, 博士, E-mail: dongmei wang@swjtu.edu.cn。

Received: 2024-02-18

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 22176154); Natural Science Foundation of Sichuan (No. 2022YFS0502)

Author brief: LUO Hesong (1998-), main research interest: water pollution abatement, E-mail: l2365482116@163.com.

WANG Dongmei (corresponding author), PhD, E-mail: dongmei wang@swjtu.edu.cn.

wastewater separation technology. The static and dynamic experimental methods have been applied to the systematic study of the pollution indicators and leaching laws of shotcrete. The static experimental results show that when water comes into contact with newly poured concrete, the large release of alkaline substances can lead to a rapid increase in the pH of the water, becoming an important pollution factor affecting the water quality. The dynamic experimental results show that the curing time of concrete, the ratio of water to concrete (the volume-to-volume ratio of water sample to concrete, L/S), and the contact area between concrete and water all affect the water quality. When the curing time of the concrete is less than three days, the calcium hydroxide crystal inside the concrete is not solidified by the C-S-H gel, which is easy to continue to precipitate, leading to the pH of the contact water sample exceeding the standard. With the increase of curing time, the leaching alkaline substances decrease significantly. When the maintenance time reaches 28 days, the pH of the leaching solution drops below 9, which can meet the requirements of comprehensive wastewater discharge. When the L/S ratio is low, the leaching substance has a significant impact on the pH and alkalinity of the water sample. When the L/S ratio exceeds 40:1, the leaching substance has no significant impact on the water quality of the water sample. The larger the contact area between the concrete and water samples, the easier it is for alkalis in the concrete to dissolve and precipitate, and the more significant the impact on the pH and alkalinity of the water quality.

Keywords: drainage; separation of clean and dirty water; shotcrete; leaching substances; tunnel construction

隧道施工是道路建设中对周围地表水影响最大的活动之一^[1],特别是当隧道建设位于环境敏感地区时,隧道开挖、衬砌、灌浆等施工过程中会产生大量废水,这些废水直接排放可能会造成严重的环境问题^[2]。目前,隧道施工废水主要采用物理沉降等方式处理后排放,但在隧道施工场地受限的情况下,施工废水会因沉降时间不足导致悬浮物超标排放。针对此问题,有学者提出隧道施工排水“清污分流”技术^[3-5],即在洞内两侧设置临时侧沟,收集掌子面、初支段及二衬段的线状水和股状涌水,作为清水直接排放,掘进过程中产生的排水则利用中心排水沟收集,进入污水站处理后排放。实际工程中,掌子面和初支段的涌水在隧道水压较小时沿侧壁流至侧沟,二衬段盲管涌水也会与隧道衬砌材料发生接触,隧道内喷射的混凝土在与隧道涌水接触时产生的浸出物质会对水质产生一定影响。

未稳定的混凝土接触隧道涌水会导致水体pH值迅速升高^[6],Setunge等^[7]对养护24 h的混凝土浸出试验结果表明,水体的pH值在12 h内升至11.5。王家庆等^[8]使用复合降碱工艺处理生态混凝土,然后进行浸出试验,发现浸出液的pH值仍达到11以上。此外,水泥生产过程中使用的初级和次级原料中锌、铬、铜、钙、镁、钾、钠等元素在未稳定的混凝土中也可能被水体浸出^[9]。因此,隧道涌水流经未稳定的喷射混凝土时,浸出物质会影响工程排水水质,对受纳水体的水质构成威胁^[10]。

混凝土的浸出物质含量受多种因素影响。养护时间对混凝土表面渗透性有明显影响,当混凝土

材料养护时间不足时,会导致混凝土中胶凝材料水化不充分, Cl^- 在混凝土表面的扩散显著增加^[11-12]。因表面积会影响固/液交换表面的大小,体积与表面积之比会影响混凝土中元素的浸出速率^[13]。水固比(水体体积与混凝土体积比, L/S)也是影响浸出物的一个重要因素,Takahashi等^[14]通过槽浸试验发现,浸出液中Cr的累积量随 L/S 的减小而增加。以上研究侧重于分析浸出对混凝土性能的影响,隧道涌水流经喷射混凝土的浸出物对水质的影响规律还未见报道。

笔者选用某隧道施工的真实原料及配比,采用静态试验和动态试验探究隧道喷射混凝土浸出过程中浸出物的成分特征,并探究养护时间、不同 L/S 、接触面积对隧道混凝土浸出液的影响,在此基础上提出涌水作为清水排放的具体策略。

1 试验材料与方法

1.1 原材料和配比

试验用水泥为四川峨眉佛光牌P·O 42.5水泥,其质量符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)的相关要求,该水泥的主要化学成分及含量见表1;细骨料为粒径小于5 mm的中砂;减水剂为聚羧酸系高性能减水剂缓凝型,减水率为30%;速凝剂为J85型速凝剂;粗骨料为四川省某碎石厂生产的5~10 mm碎石;水为去离子水。

混凝土制作配比如表2所示,水胶比为0.37,所制得混凝土强度为C30,满足隧道喷射混凝土的性能要求。

表 1 水泥的化学成分及含量

Table 1 Chemical composition and content of cement

%					
CaO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
62.91	22.37	3.83	3.20	3.82	2.52

表 2 混凝土配比

Table 2 Concrete mix proportions

kg/m ³					
水泥	细骨料	粗骨料	水	减水剂	速凝剂
473.00	907.00	3.20	171.00	33.11	4.73

1.2 试样的制备

按照混凝土配比称取胶凝材料和骨料倒入塑料桶中,搅拌约 3 min 后缓慢倒入水与减水剂的混合溶液,搅拌约 8 min 后将新拌混凝土倒入混凝土塑料试模内,并将试模中的混凝土摇匀,防止内部出现孔洞,10 min 后人工抹平试件上表面。试件体积约为 50 cm³,净重约 80 g,储存在试验室中,浇筑 2 d 后拆模,然后放置在温度 25 ℃、相对湿度 95% 的养护箱内养护。

1.3 试验方法

1.3.1 混凝土静态浸出试验

为研究混凝土浸出过程中浸出物成分特征,设计了混凝土静态浸出试验。使用带螺旋盖且体积为 3 L 的聚四氟乙烯塑料桶作为容器,为保证试件和容器底部有足够的距离,在容器底部放置高为 3 cm 的三角塑料棒垫片,试验装置如图 1 所示。将养护时间为 3 d 的混凝土试件使用纯水清洗干净,然后放置在容器中,加入 1 L 去离子水,试验过程中,混凝土试件完全浸泡在水中,并用螺旋盖密封,防止空气中 CO₂ 溶于水中与析出物质反应。每天取 100 mL 浸出液进行分析并向容器中补充等量去离子水。

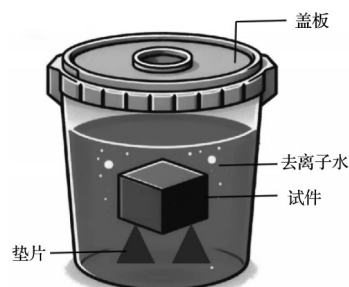


图 1 浸出试验装置

Fig. 1 Leaching device

1.3.2 混凝土动态浸出试验

为研究养护时间对混凝土浸出液水质的影响,参考欧洲发布的关于建筑材料浸出标准化试验的“动态表面浸出测试”(DSLIT)^[15],分别在试件养护后 1、3、7、14、28 d 后(依次编号为 CT-1、CT-3、CT-7、

CT-14、CT-28)进行动态浸出试验。试验过程中浸出液与试件的体积比为 20:1,试件表面积与水体积比为 80 cm²/L。为连续监测浸出液水质的变化,每隔 1 d 进行取样并更新浸出液。

为研究 L/S 比对浸出液水质的影响,分别控制浸出液与试件的体积比为 10:1、20:1、40:1、80:1 (编号依次为 LS-1、LS-2、LS-3、LS-4)进行动态浸出试验。试验所用装置与混凝土静态浸出试验的装置相同。试验中所选用试件的养护时间为 3 d,试件表面积与水体积比为 80 cm²/L。

为研究不同接触面积对混凝土浸出液水质的影响,在保证试件净重为 80 g 的条件下,制作 1 块尺寸为 40 mm×40 mm×30 mm(总表面积为 80 cm²)、2 块尺寸为 40 mm×20 mm×30 mm(总表面积为 104 cm²)、3 块尺寸为 40 mm×40 mm×10 mm 的试件(总表面积为 144 cm²),控制试件表面积与水体积比分别为 80、104、144 cm²/L,进行动态浸出试验,依次编号为 CA-1、CA-2、CA-3,浸泡水量为 1 L,所选用试件的养护时间为 3 d。

1.4 监测指标与分析方法

1.4.1 监测指标

取样前将试件取出,用玻璃棒搅拌 1~2 min,以保证水样均匀且分散。将浸出液装满两个体积为 50 mL 的聚乙烯小瓶。一份用于重金属元素分析,使用 10% HNO₃ 酸化至 pH 值小于 2,储存在 (4±2)℃ 温度下,直到进行重金属元素分析。另一份立即进行 pH 值和碱度(CaCO₃ 碱度)测定。

1.4.2 检验方法

采用 Kruskal-Wallis 方法对试验中多个试件总体分布是否相同进行非参数检验^[16]。首先将多组样本数据混合并按升序排序,求出各变量的秩,然后按照式(1)计算 K 统计量,获取统计量的 p 值并进行分析。若 $p < \alpha$,则拒绝原假设(α 为显著水平;原假设通常为多个独立样本的总体分布无显著差异);若 $p > \alpha$,则不能拒绝原假设,即为有显著性差异。

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^n n_i (\bar{R}_i - \bar{R}) \quad (1)$$

式中: N 为总样本量; n 为样本组数; n_i 为第 i 组的样本量; \bar{R}_i 为第 i 组的平均秩; \bar{R} 为总平均秩。

2 结果与讨论

2.1 材料表征分析

2.1.1 XRD 分析

养护 3、28 d 的混凝土试件 XRD 检测结果见图 2。养护时间为 3 d 时,试件的主要产物为钙矾石、Ca(OH)₂、CaCO₃ 及 C-S-H 凝胶,这些产物主要由

C_3A 、 C_3S 与 C_2S 等水泥熟料水化生成。曲线上还有数个明显的 C_3S 特征峰,说明此时的混凝土水化不完全,残存较多的水泥熟料。随着水化程度不断加深,可以看到,在28 d的XRD曲线上, C_3S 特征峰的个数减少, $C-S-H$ 凝胶特征峰的个数明显增加, $Ca(OH)_2$ 的衍射峰并未消失,在28 d时 $Ca(OH)_2$ 仍有相当存量。

2.1.2 SEM表征分析

养护3、28 d混凝土试件的SEM检测结果见图3。养护3 d的混凝土试件水化不足,内部结构较为松散,毛细孔道纵横交错。由于普通硅酸盐水泥熟料中 C_3A 的水化速度最快,此时混凝土内部生成大量针簇状的钙矾石,而 $Ca(OH)_2$ 晶体以六面体的形式存在,这使得 $Ca(OH)_2$ 晶体难以作为针状的钙矾石骨架^[17],因此, $Ca(OH)_2$ 晶体呈叠层状生长,被暴露在内部的孔隙之间。28 d时,混凝土水化反应较

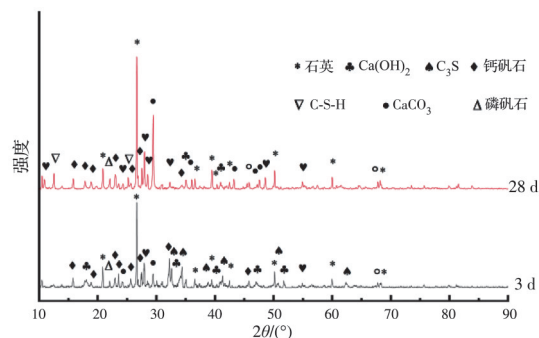


图2 不同养护时间混凝土试件矿物组成

Fig. 2 Mineral composition of concrete specimens at different ages

为完全,针状物质减少, $C-S-H$ 凝胶量增加,分布在试件毛细孔道内部和孔洞周围。在基质部分, $C-S-H$ 凝胶覆盖在层片状 $Ca(OH)_2$ 晶体表面,与之结合紧密,并且这些絮状 $C-S-H$ 凝胶体形成搭接,使混凝土内部微观结构趋于致密^[18]。

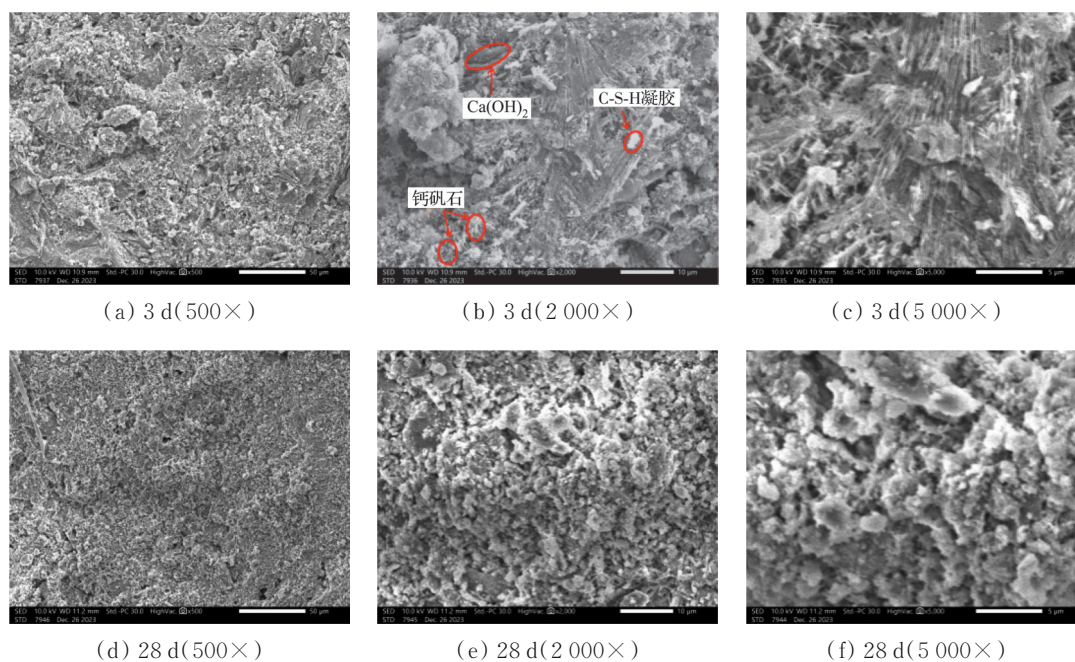


图3 不同养护时间混凝土试件的微观形貌

Fig. 3 Microstructure of concrete samples at different ages

2.2 隧道混凝土中浸出物的分析

静态浸出试验的pH值和碱度变化情况见图4。在浸出试验的前3 d,试件浸出液的pH值逐步提升,最高达到11.55。3 d以后浸出液的pH值和碱度有所下降,一方面是因为每次取样后均会补充等量的去离子水,对浸出液有一定的稀释作用,另一方面是因为每次取样均会导致浸出液与空气中的二氧化碳接触,浸出液中部分 OH^- 被中和,从而导致pH值降低;同样地,碱度也有所降低。但试验期间pH值均保持在11以上,大于《污水综合排放标准》一级排放标准的限值($pH < 9$)。这与蒋雅君等^[19]的研究

结果一致。

此外,在静态浸出试验期间检测了Cu、Pb、Cd、Zn、Fe、Cr、Mn七种重金属元素的浓度,检测结果见表3(Zn、Mn未检出,故在表中未列出)。7种重金属元素中,Fe的浸出浓度最高,为0.070 mg/L,低于《地表水环境质量标准》对集中式生活饮用水地表水源地的限值(0.3 mg/L),这与Gwenzi等^[20]、Wang等^[21]的研究结果一致。Cr、Cu、Cd和Pb浸出浓度均低于《地表水环境质量标准》Ⅱ类水体的限值Ⅱ,且达到了《污水综合排放标准》一级排放标准的要求。

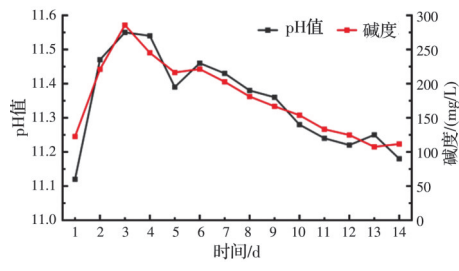


图 4 pH和碱度随浸泡时间的变化

Fig. 4 Changes in pH and alkalinity with soaking time

表 3 重金属元素浸出浓度

Table 3 Concentration of heavy metal element leaching

时间/d	浓度/(mg/L)				
	Fe	Cr	Cu	Pb	Cd
1	0.021	0.001	0.014	0.002	0.000
3	0.027	0.006	0.018	0.001	0.001
5	0.027	0.022	0.013	0.000	0.000
7	0.036	0.026	0.015	0.001	0.001
9	0.037	0.000	0.025	0.000	0.001
11	0.047	0.032	0.019	0.010	0.002
13	0.054	0.034	0.035	0.000	0.002
14	0.070	0.042	0.033	0.001	0.005
标准 1 允许值	0.300	0.050	1.000	0.010	0.005
标准 2 允许值		1.500	0.500	1.000	0.100

注:标准 1 允许值为《地表水环境质量标准》对Ⅱ类水体的限值;标准 2 允许值为《污水综合排放标准》一级排放标准的限值。

浸出试验结果表明,当水体与新浇筑的隧道喷射混凝土接触时,混凝土释放出的 OH^- 会导致 pH 值升高,使水质不达标。而 Fe、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 和 Mn 七种重金属的浓度均在《污水综合排放标准》一级排放标准的允许范围内。因此,动态试验关注 pH 值及引起 pH 值升高的碱性物质变化。

2.3 养护时间对水质的影响

养护时间对喷射混凝土浸出液 pH 值和碱度的影响结果如图 5 所示。当养护时间小于 3 d 时,在浸出试验的第 1 d,浸出液的 pH 值超过了 11,随着每日换水,pH 值逐步降低,最终 pH 值依旧大于 10。

混凝土中无机成分的浸出机制包括表面溶解和扩散^[22-23]。表面溶解指试件中的水化产物和金属氧化物与水反应,引起无机成分的浸出。扩散是指由于分子运动而导致无机成分的浸出。在养护初期,水泥的水化还不完全,孔隙和通道较多^[24],当试件与水体接触时,液体快速渗入试件孔隙中,此时试件内部层状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体未被固化,大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解到孔隙液中,随后因浓度梯度差不断扩散,进入溶液中^[19]。

浸出液中 Ca^{2+} 的浓度及其与 pH 值和碱度的相关性分析结果进一步验证了以上分析。由表 4 可知,浸出液中 Ca^{2+} 与碱度的均值比为 0.59:1,符合

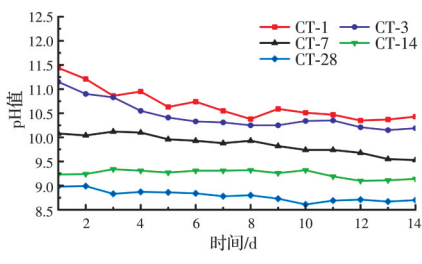
溶液中碱度对阳离子的要求,且 Ca^{2+} 和碱度的相关性系数为 0.926,属于强相关。由以上分析可知,浸出液碱度来自 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶出。

表 4 相关性分析结果

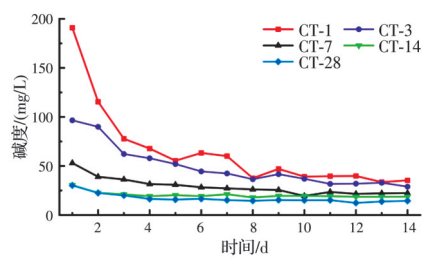
Table 4 Correlation analysis results

参数	均值	标准差	1	2	3
Ca^{2+}	23.58 mg/L	8.21	1		
pH 值	10.06	0.61	0.763**	1	
碱度	40.76 mg/L	18.33	0.926**	0.935**	1

注:** $p < 0.01$ 。



(a) pH 值



(b) 碱度

图 5 养护时间对浸出液 pH 值和碱度的影响

Fig. 5 Effect of curing time on pH and alkalinity leaching

当养护时间达到 7 d 时,pH 值最终能稳定保持在 9.5 左右,且不再随浸出时间变化。当养护时间达到 14 d 时,浸出液 pH 值保持在 9.2~9.3 之间,接近《污水综合排放标准》一级排放标准对 pH 值的要求。当养护时间达到 28 d 时,混凝土水化反应较完全,抗 OH^- 浸出能力强,浸出液的 pH 值降至 9 以下,达到《地表水环境质量标准》Ⅱ类水体对 pH 值的要求。养护时间小于 7 d 时,隧道喷射混凝土的耐浸出性能恶化,浸出液中 pH 值和碱度会超标。由于隧道施工过程中掘进段(仰拱至掌子面)混凝土的喷射时间一般在 3~30 d,在后续试验中,以最不利养护时间 3 d 的混凝土为对象,探讨不同 L/S 比和接触面积对浸出液 pH 值和碱度的影响。

2.4 L/S 比对浸出液水质的影响

L/S 比对混凝土浸出液 pH 值和碱度的影响结果如图 6 所示。随着 L/S 比的增加,pH 值和碱度均有所下降。当 L/S 比为 10:1 时,浸出试验第 1 天时 pH 值和碱度分别达到 11.64、437 mg/L,在第 14 天时 pH 值仍有 10.47,属于强碱废水。以 L/S 比为 10:1

浸出液的 pH 值和碱度为参考,当 L/S 比为 20:1 时, pH 值在第 1、第 14 d 分别降低 0.49、0.28,碱度分别下降 302.87、13.43 mg/L;当 L/S 比大于 40:1 时, pH 值最终可以稳定在 9.5 左右,碱度可以控制在 10 mg/L 以下。

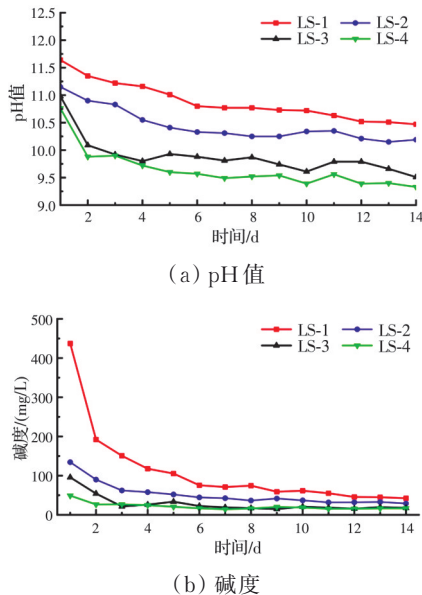


图 6 L/S 比对浸出液 pH 值和碱度的影响
Fig. 6 Effect of L/S ratio on pH and alkalinity leaching

采用 Kruskal-Wallis 检验进行比较分析 ($\alpha < 0.1$), 结果如表 5 所示, LS-3 和 LS-4 两组的碱度 p 值为 0.378, 不存在显著差异, 而 LS-3 和 LS-2 之间、LS-2 和 LS-1 之间均存在显著差异, 表明 L/S 比对隧道混凝土浸出的影响是非线性的, 随着水量增加对水质的影响变小。此外, 通过对比不同组别浸出液的碱度, 发现在浸出试验前期差异较大, 而到后期各组间的差异较小, 这是由于在浸出初期, 浸出液与混凝土表面快速建立离子平衡的过程主要受到表面溶解的影响, 后期碱性物质主要通过扩散机制进入水体, 这与 Plecas^[25] 的研究结果一致。

表 5 多重比较检验的 p 值
Table 5 The p -value of multiple comparison test

LS-4/LS-3	LS-3/LS-2	LS-2/LS-1
0.378	0.009	0.078

2.5 接触面积对水质的影响

如图 7 所示, 随着接触面积的增大, pH 值显著增大, CA-2 的 pH 值在第 1 天、第 14 天分别为 11.25、10.65, 相比 CA-1, 分别提高了 0.1、0.46, 碱度分别提高了 53.03、9.66 mg/L。CA-3 的 pH 值在第 1 天、第 14 天分别为 11.45、10.79, 相比 CA-1, 分别提高了 0.3、0.6, 碱度分别提高了 87.21、17.09 mg/L。

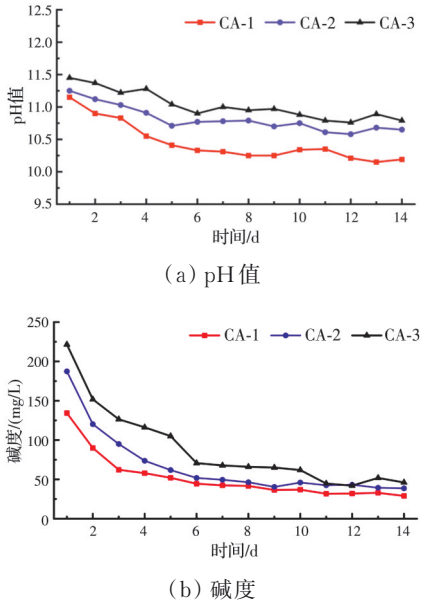


图 7 接触面积对浸出液 pH 值和碱度的影响
Fig. 7 Effect of contact area on pH and alkalinity leaching

混凝土试件表面的大部分碱性物质多被包裹在已经固化的 C-S-H 凝胶体中, 但仍有部分游离的氧化物和碱性物质, 增大接触面积会使这部分游离的氧化物和碱性物质更容易通过表面冲刷或溶解的方式进入水体。此外, 试件与水体的接触面积越大, 意味着提供了更多的孔隙和通道, 使水化过程中产生的碱性物质通过扩散进入浸出液中, 进而导致 pH 值升高。Kruskal-Wallis 检验也表明接触面积对 pH 值和碱度存在显著影响 (p 值分别为 0.007、0.001)。以上结果说明, 增大混凝土与水体接触面积后, 混凝土中的碱性物质更易溶解析出。

3 结论

采用静态和动态试验分析隧道喷射混凝土浸出物成分特征、影响因素及对水质的影响规律, 结论如下:

1) 未稳定的混凝土与水接触时, 其中的碱性物质溶出, 从而使水体的 pH 值升高。养护时间、 L/S 比、接触面积对浸出水水质均有影响, 养护时间大于 28 d 时, 耐浸出性能明显提升, L/S 比高于 40:1, 对浸出水水质的影响变小, 接触面积的增大会增加碱性物质的溶出。

2) 混凝土中碱性物质的浸出主要包括表面溶解和扩散两个过程。表面溶解过程受碱性物质与 C-S-H 凝胶结合情况和表面积大小的影响, 扩散过程主要受混凝土孔隙结构和浓度梯度的影响; 浸出初期以表面溶解为主, 浸出后期主要受扩散机制的控制。

3)在隧道初支和二衬段,混凝土的喷射时间一般大于28 d,此区域的涌水水质基本不受混凝土的影响;隧道掘进段的股状水,水量大且与喷射混凝土基本无接触,考虑到隧道施工的现场要求,建议采用具备耐压性和弯曲性的柔性排水管等方式收集至清水沟排放;隧道掘进段的非股状水则存在碱性物质超标的风险,应作为污水统一收集处理后排放。

参考文献

- [1] GHORBANI MOOSELU M, LILTVED H, AKHTAR N. Characterization and treatment of tunneling wastewater using natural and chemical coagulants [J]. *Water Science & Technology*, 2023, 88(10): 2547-2565.
- [2] LEE J H, KIM J O, JEONG S U, et al. Characterization of membrane foulants in a pilot-scale tunnel construction wastewater treatment process [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 384-388.
- [3] 李传松,茹旭,曾庆华,等.顺坡铁路隧道施工废水清污分流方法研究与应用[J].*铁道建筑*, 2018, 58(10): 60-62, 77.
LI C S, RU X, ZENG Q H, et al. Research and application on separate drainage method of clean water and muddy water out of construction wastewater in downward railway tunnel [J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(10): 60-62, 77. (in Chinese)
- [4] 茹旭.铁路隧道钻爆法施工废水治理关键技术研究[J].*铁道标准设计*, 2019, 63(5): 156-159.
RU X. Study on key technology of sewage treatment for railway tunneling by drilling and blasting [J]. *Railway Standard Design*, 2019, 63(5): 156-159. (in Chinese)
- [5] 薛正.铁路隧道施工废水处理存在的问题[J].*铁道建筑*, 2021, 61(4): 57-61.
XUE Z. Problems of wastewater treatment in railway tunnel construction [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(4): 57-61. (in Chinese)
- [6] LAW D W, EVANS J. Effect of leaching on pH of surrounding water [J]. *ACI Materials Journal*, 2013, 110(3): 291-296.
- [7] SETUNGE S, NGUYEN N, ALEXANDER B L, et al. Leaching of alkali from concrete in contact with waterways [J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2009, 9(5): 381-391.
- [8] 王家庆,吴健生,黄凯健,等.生态混凝土绿色护坡的植生性与耐久性[J].*土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(4): 29-40.
WANG J Q, WU J S, HUANG K J, et al. Planting performance and durability of eco-concrete for slope protection [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(4): 29-40. (in Chinese)
- [9] LU H X, WEI F, TANG J C, et al. Leaching of metals from cement under simulated environmental conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 169: 319-327.
- [10] ADAMSON R. Leaching of alkali from freshly cast concrete in contact with water [D]. Melbourne: RMIT University, 2011.
- [11] PAN X Y, SHI Z G, SHI C J, et al. A review on surface treatment for concrete-Part 2: Performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133: 81-90.
- [12] 万志辉,戴国亮,龚维明,等.海水环境下钙质砂水泥土加固体的微观侵蚀机制试验研究[J].*岩土力学*, 2021, 42(7): 1871-1882.
WAN Z H, DAI G L, GONG W M, et al. Experimental study on micro-erosion mechanism of cement stabilized calcareous sand under seawater environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1871-1882. (in Chinese)
- [13] GEANKOPLIS C J. Transport processes and separation process principles (Includes unit operations) [M]. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.
- [14] TAKAHASHI S, SAKAI E, SUGIYAMA T. Study on leaching of hexavalent chromium from hardened concretes using tank leaching test [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2007, 5(2): 201-207.
- [15] DIN E. Construction Products-Assessment of release of dangerous substances-Part 2: Horizontal dynamic surface leaching test; German version: DIN CEN/TS 16637-2 [S]. Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany, 2014.
- [16] 张志俊,王盼盼.基于Kruskal-Wallis检验的公路货运车辆实载率差异分析[J].*交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(5): 216-220, 241.
ZHANG Z J, WANG P P. Loading rate variance analysis for road freight vehicles based on Kruskal-Wallis test [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(5): 216-220, 241. (in Chinese)
- [17] 黄华,郭梦雪,张伟,等.粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(3): 74-84.
HUANG H, GUO M X, ZHANG W, et al. Mechanical property and microstructure of geopolymer concrete based on fly ash and slag [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(3): 74-84. (in Chinese)
- [18] LIU Z G, LIU G R, ZHANG G S. Effect of curing time on the surface permeability of concrete with a large amount of mineral admixtures [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022: 1034388.
- [19] 蒋雅君,林利达,刘世军,等.接触溶蚀条件下喷射混凝土钙离子析出规律探究[J].*中国公路学报*, 2023, 36

- (6): 171-179.
- JIANG Y J, LIN L D, LIU S J, et al. Study on calcium ion dissolution law of shotcrete under contact corrosion condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6): 171-179. (in Chinese)
- [20] GWENZI W, MUPATSI N M. Evaluation of heavy metal leaching from coal ash-versus conventional concrete monoliths and debris [J]. Waste Management, 2016, 49: 114-123.
- [21] WANG C Q, CHENG L X, HUANG Q C, et al. Basic performance, heavy metal leaching mechanism and risk assessment analysis of waste concrete [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(2): 122.
- [22] BEDDOE R E, MÜLLAUER W, HEINZ D. On leaching mechanisms of major and trace elements from concrete: Carbonation, exposure to deicing salt and external sulphates [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103435.
- [23] LIU Q, WANG X N, GAO M, et al. Heavy metal leaching behaviour and long-term environmental risk assessment of cement-solidified municipal solid waste incineration fly ash in sanitary landfill [J]. Chemosphere, 2022, 300: 134571.
- [24] OVERMANN S, LIN X C, VOLLPRACHT A. Investigations on the leaching behavior of fresh concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121390.
- [25] PLECAS I B. Effect of curing time on the fraction of Cs¹³⁷ from cement matrix [J]. Annals of Nuclear Energy, 2003, 30(15): 1587-1590.
- (编辑 胡玲)