煤气化渣膏体充填材料适用性及对地下水水质的影响分析*

李伟[1],尹大伟[2],刘健[1],王宪敏[3],辛林[4],隋建才[1],关天举[3]

(1.山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014;
2.山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛市 266590;
3.山东能源集团新能源集团有限公司, 山东 济南 250014;
4.山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛市 266590)

摘要:煤炭资源开采与利用过程中产生大量煤气化渣,其高效绿色处置是煤炭领域亟待解决的关键问题之一。通过正交试验系统,系统研究了煤气化渣膏体充填材料的工作性能与力学性能,并对比了其与现行标准规范的符合性。采用极差分析法确定最优配比为:渣膏比2.5∶1.5、灰掺比2∶2、浆料质量浓度76%,对应煤气化渣掺量为11.7%。采用静态浸出法对该材料进行了浸泡试验,检测不同龄期浸出液的水质指标。结果表明:浸出液各项指标后期趋于稳定,符合地下水Ⅲ类水质标准,满足地下水质量基本要求。利用F值法进行水质综合评价,结果显示,不同浸泡天数的地下水质量等级主要为"良好",虽随浸泡时间延长水质略有下降,但整体仍处于安全状态。与传统膏体充填材料相比,煤气化渣膏体充填材料成本降低16%,综合性能显著提升,为煤气化渣膏体充填技术的工程应用提供了重要依据,对实现煤基固废资源化利用与地下水质保护具有重要意义。

关键词:膏体充填;煤气化渣;适用性;地下水水质;静态浸出法

中图分类号:TD80.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0039-11

Analysis of the Applicability of Coal Gasification Slag Paste Filling Material and Its Influence on Groundwater Quality

Li Wei[1], *Yin Dawei*[2], *Liu Jian*[1], *Wang Xianmin*[3], *Xin Lin*[4], *Sui Jiancai*[1], *Guan Tianju*[3]

(1.Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China;
2.College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3.Shandong Energy Group New Energy Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China;
4.College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Large quantities of coal gasification slag are generated during the exploitation and utilization of coal resources, and the efficient and green disposal of this slag is one of the key issues that urgently needs to be resolved in the coal sector. Through an orthogonal experimental system, the working and mechanical properties of coal gasification slag paste filling materials were systematically studied, and their compliance with current standard specifications was compared. Using range analysis, the optimal mix proportion was determined as follows: a slag-to-gypsum ratio of 2.5∶1.5, a fly ash blending ratio of 2∶2, a slurry mass concentration of 76%, and a corresponding coal gasification slag content of 11.7%. The static leaching method was adopted to conduct immersion tests on this material, and the water quality indicators of the leachate at different immersion ages were examined. The results show that the indicators of the leachate stabilize in the later stage, comply with the Class III groundwater quality standard, and meet the basic requirements for groundwater quality. The F-value method was employed for a comprehensive water quality assessment. The results indicate that the groundwater quality grade for different immersion durations is predominantly "Good". Although the water quality declines slightly with prolonged immersion time, it remains in a safe state overall. Compared with traditional paste filling materials, the cost of the coal gasification slag paste filling material is reduced by 16%, and the comprehensive performance is significantly enhanced. This provides an important basis for the

* **收稿日期**:2025-08-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52374211)
作者简介:李伟(1966—),男,山东济南人,博士,研究员,主要从事煤炭开采、技术研究、能源转型、企业管理等工作。E-mail:zhbgs@shandong-energy.com
通信作者:辛林(1984—),男,山东肥城人,博士,教授,主要从事煤炭地下气化技术研究。E-mail:xinlinsdust@sdust.edu.cn

engineering application of coal gasification slag paste filling technology and holds great significance for realizing the resource utilization of coal-based solid waste and the protection of groundwater quality.

Key words: Paste filling, Coal gasification slag, Applicability, Groundwater quality, Static leaching method

0 引言

煤炭作为我国主体能源,在能源结构中占据核心地位[1-3]。煤气化技术[4-5]在生产合成气、甲醇等化工产品过程中,会产生大量的煤气化渣固废。据统计,我国每年煤气化渣产生量已达数千万吨[6-7],且呈逐年增长趋势。传统的煤气化渣堆存处置方式不仅占用大量土地资源,存在滑坡等灾害隐患,且废渣中的重金属、酸碱物质等会随雨水淋溶渗透,严重污染土壤与水环境,威胁生态安全和人类健康。

将煤气化渣制备成膏体充填材料,为其大规模资源化消纳提供了新途径。然而,煤气化渣成分复杂、物理化学性质差异显著,直接影响膏体充填材料的制备工艺、力学性能与长期稳定性,进而决定其在不同地质条件与工程需求下的适用性。此外,充填体长期赋存于地下环境中,煤气化渣中的有害物质是否会溶出进入地下水、威胁地下水水质安全,是制约该技术推广应用的关键科学问题。

长期以来,国内外学者针对煤气化渣、粉煤灰、水泥基材料对地下水环境的影响开展了大量研究。余其俊等[8]通过试验研究了粉煤灰水泥砂浆试块及粉煤灰硬化体中重金属离子的溶出特性,得出了重金属离子的溶出规律,提出了 Cr^{6+} 溶出抑制方法。王希梅等[9]系统分析了粉煤灰的物理化学性质,总结了粉煤灰中元素的浸出特性及其对地下水环境的影响,提出了灰场建设的关键注意事项。王正辉等[10]分析了金川矿区矿坑废水的化学成分,发现其由裂隙水、生产废水和充填料浆溢流水组成,呈弱碱性,钙、镁含量较高,各项指标满足《混凝土用水标准》要求。何丽君等[11]分析了煤气化渣淋洗前后的微观结构特征、化学元素组成以及重金属的形态组成,探究了煤气化粗渣中重金属在静态浸出与动态淋滤条件下的浸出行为,评估了其作为充填材料的环境风险。贾建丽等[12]设计了尺寸为 Φ40 mm×400 mm 的淋滤柱,模拟煤气化粗渣淋滤过程中污染物迁移到地下水中的浓度,从而评估其对地下水环境的影响。

上述研究为认识煤气化渣、粉煤灰等固废对地下水环境的影响提供了理论依据。然而,现有研究多聚焦于膏体材料的配比优化和力学性能测试,缺乏对不同地质条件下材料适用性的系统研究;在环境影响方面,对地下水水质长期动态变化规律及其影响机制的研究仍有待深入。鉴于此,本文通过正交试验与极差分析法,确定了煤气化渣膏体充填材料的最优配比,利用静态浸出法对煤气化渣膏体充填材料进行了浸泡试验,检测不同时期浸出液的离子浸出浓度,明确煤气化渣膏体充填材料对地下水水质的影响规律。研究结果可为实现煤基固废资源化利用和地下水水质保护提供科学依据。

1 试验方案设计

1.1 配比方案设计

采用正交试验设计本次配比方案,试验所用主要原材料包括煤气化渣、脱硫石膏、粉煤灰、水泥和煤矸石。定义煤气化渣与脱硫石膏的质量比为渣膏比;将粉煤灰与组合式胶结掺合料的比例称为灰掺比,其总量代表了胶凝材料的总含量。

本次正交试验固定胶结材料配比(水泥与煤矸石的质量比为 1∶6),选取的因素及因素水平为:渣膏比分别选取 2.5∶1.5、2∶2、1∶3、0∶4;灰掺比分别取 3∶1、2.5∶1.5、2∶2、1.5∶2.5;质量浓度分别为 72%、74%、76%、78%。采用 $L_{16}(4^5)$ 五因素四水平正交试验表,表 1 给出了煤气化渣充填体正交试验设计方案。

表 1 正交试验设计方案

Table 1 Orthogonal experimental design scheme

水平	渣膏比 *A*	灰掺比 *B*	质量浓度 *C*/%	水泥 *D*	矸石 *E*
水平 1	2.5∶1.5	3∶1	72	1	6
水平 2	2∶2	2.5∶1.5	74		
水平 3	1∶3	2∶2	76		
水平 4	0∶4	1.5∶2.5	78		

1.2 水样测试方案

充填体试样性能测试包括工作性能(坍落度、扩展度、泌水率)和力学性能(单轴抗压强度)。通过性能测试确定煤气化渣膏体充填材料的最优配比。

确定最优配比后,采用静态浸出法制备浸出水样。将按最优配比配制的膏体充填体试样脱模后标准养护 28 d,置于聚乙烯桶中,按固液比 1∶10 加入蒸馏水,加盖密闭浸泡试件,定期搅拌,分别于浸泡 1、10、15、28、37、61、85 d[13]时提取上层清液,得到

待检水样。严格遵循《生活饮用水标准检验方法》中规定的检测方法,对浸出液中的重金属离子含量进行检测;检测后,依据《地下水质量标准》[14]进行水质评价。

2 煤气化渣膏体充填材料的适用性分析

2.1 充填材料性能测试

煤气化渣膏体充填材料的坍落度、扩展度和泌水率测试结果见表2。基于表2试验数据绘制不同煤气化渣掺量下坍落度、扩展度和泌水率的变化趋势图(见图1)。

表2 充填材料的工作性能

Table 2 Working performance of filling materials

试验编号	煤气化渣掺量/%	坍落度/cm	扩展度/cm	泌水率/%
G01	1.2	19.2	35.3	3.05
G02	1.8	23.7	36.8	1.42
G03	2.0	23.6	34.2	2.30
G04	2.3	22.5	38.0	1.52
G05	2.8	24.2	38.3	2.09
G06	3.6	20.2	37.9	1.98
G07	4.4	20.1	40.9	2.54
G08	4.5	25.4	39.2	1.87
G09	5.6	21.4	33.1	2.09
G10	6.1	18.7	35.3	1.72
G11	6.6	27.2	40.4	2.52
G12	8.5	27.1	30.0	2.57
G13	9.6	27.8	34.0	2.77
G14	11.7	22.6	38.7	2.79
G15	13.2	28	32.3	2.82
G16	15.0	25.6	38.7	2.55

由图1(a)可知,膏体充填材料的坍落度随煤气化渣掺量的增加呈逐渐增大趋势。这是因为煤气化渣的颗粒形状和表面性质与普通胶凝材料存在差异,经研磨后的煤气化渣颗粒细小,比表面积较大;当煤气化渣掺量增加时,体系中存在更多的细小颗粒,颗粒之间的摩擦力和咬合力随之降低;同时,煤气化渣需水量较大,会吸附更多的水分,导致用于润滑颗粒表面、使膏体具有良好流动性的自由水减少,从而导致膏体的坍落度增大。

扩展度主要表征膏体在水平方向上的流动能力。由图1(b)可知,煤气化渣掺量增加导致坍落度增大时,膏体水平流动性变差,在自重作用下向四周扩展的能力随之减弱;同时,颗粒间摩擦力增大以及自由水减少,也使得膏体难以在水平方向上充分铺展,最终导致膏体充填材料的扩展度减小。

由图1(c)可知,随着煤气化渣掺量的增加,泌水率整体呈先降低后升高的趋势。这是因为当煤气化渣掺量较低时,煤气化渣颗粒可填充至膏体充填材料的孔隙中,使膏体结构更致密,减少了水分渗出的通道,从而降低泌水率。然而,当煤气化渣掺量过高时,因其强吸水性,会吸附大量自由水,导致浆体中自由水减少,原本均匀分布的自由水被过度吸附于煤气化渣颗粒表面,当浆体静置时,这些被吸附的水分在重力作用下更容易析出,最终导致泌水率升高。

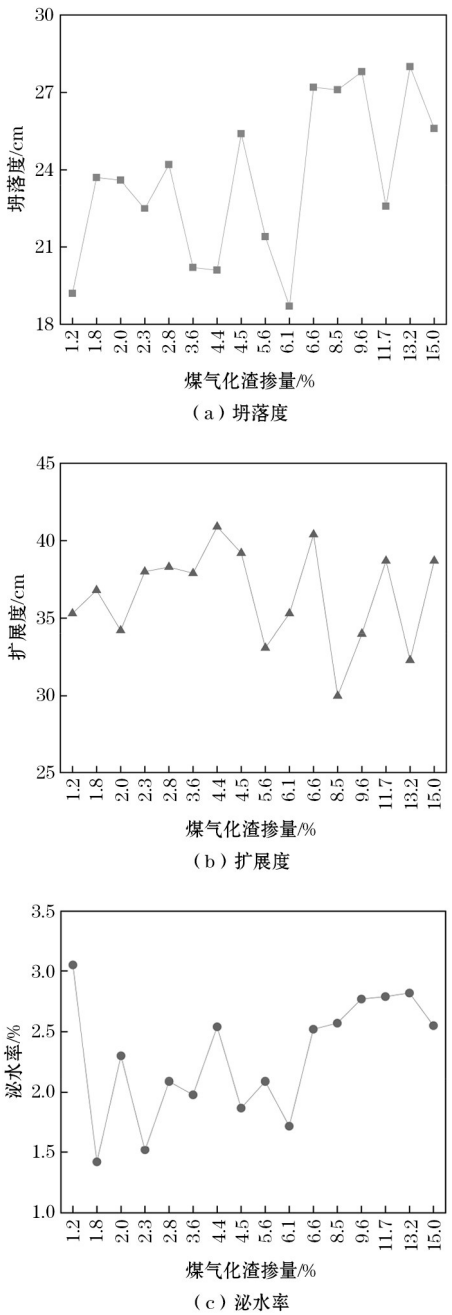


图1 不同煤气化渣掺量下的料浆工作性能变化趋势

Fig.1 Charges in working performance of slurry under different coal gasification slag dosages

由表 3 可知,煤气化渣膏体充填体试样的单轴抗压强度随养护龄期的延长而增加。在养护初期(3 d 和 7 d),煤气化渣膏体充填体试样的强度呈缓慢上升趋势。在这一阶段,水泥等胶凝材料开始发生水化反应,生成了诸如 $Ca(OH)_2$、钙矾石和水化硅酸钙等水化产物。这些水化产物在颗粒之间初步形成连接,逐渐构建起强度骨架;同时,煤气化渣中的部分活性成分与水泥水化产物发生二次水化反应,促进强度增长。在养护中期(14 d),煤气化渣膏体充填体试样的强度显著提升,水泥的水化反应仍在持续进行,煤气化渣中的活性物质与水泥水化产物之间的二次水化反应不断深入,生成的水化产物填充膏体内部孔隙,使膏体结构更加致密,从而促使煤气化渣膏体充填体试样的强度进一步提升。

表 3 试样的平均单轴抗压强度

Table 3 Average uniaxial compressive strength of specimens

试验号	煤气化渣掺量/%	各龄期平均单轴抗压强度/MPa				
		8 h	3 d	7 d	14 d	28 d
G01	1.2	0.081	1.289	2.306	3.491	4.856
G02	1.8	0.095	1.565	2.654	4.842	5.070
G03	2.0	0.100	2.210	3.977	6.240	6.774
G04	2.3	0.090	2.040	3.245	5.804	6.508
G05	2.8	0.100	1.656	2.733	5.936	6.806
G06	3.6	0.137	1.103	2.028	4.342	5.145
G07	4.4	0.142	2.507	4.369	7.223	10.210
G08	4.5	0.134	2.032	3.241	6.181	8.865
G09	5.6	0.114	1.892	3.025	6.861	7.864
G10	6.1	0.143	2.608	4.040	8.725	10.980
G11	6.6	0.156	1.290	2.018	4.423	5.439
G12	8.5	0.116	1.485	2.278	4.904	6.359
G13	9.6	0.170	1.075	4.324	7.424	11.474
G14	11.7	0.122	0.968	1.421	3.514	5.063
G15	13.2	0.172	0.894	2.442	4.550	5.228
G16	15.0	0.126	0.506	2.465	3.537	5.057

养护至 28 d 时,煤气化渣膏体充填体试样的强度增长速度逐渐放缓,但仍保持增长趋势。此时,水泥的水化反应基本完成,但煤气化渣与水泥水化产物之间的二次水化反应仍在缓慢进行。随时间推移,膏体内部的微观结构持续得到优化,孔隙率进一步降低,强度仍有所增加,但增长幅度相对较小。

2.2 充填材料性能与规范对标

2.2.1 工作性能对标

坍落度是表征膏体流动性的核心指标,可反映材料在施工过程中是否便于输送和浇筑。通过与现行标准技术要求对比,可判断煤气化渣膏体充填材料的施工适配性,确保其能在长距离管道中顺利输送并均匀填充采空区。泌水率是评价膏体稳定性的关键参数,通过与标准规范对比,可明确材料在静置凝结过程中水分析出特性,进而评估其是否会因泌水引发分层离析、强度不均等问题,保障充填施工质量。图 2、图 3 分别为不同煤气化渣掺量下坍落度、泌水率与标准规定值的对比结果。

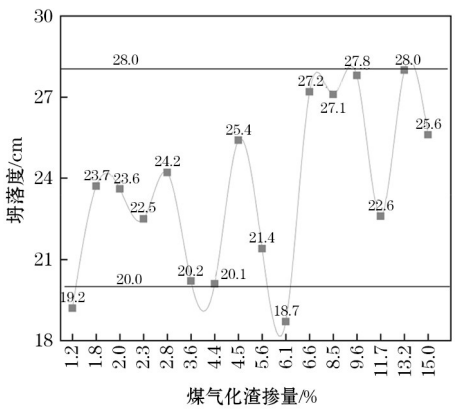


图 2 不同煤气化渣掺量下坍落度的对标结果

Fig.2 Benchmarking results of slump under different coal gasification slag dosages

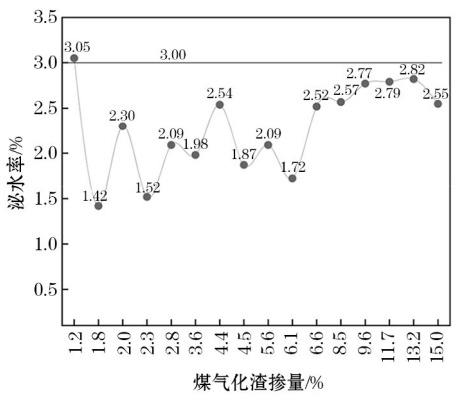


图 3 不同煤气化渣掺量下泌水率的对标结果

Fig.3 Benchmarking results of bleeding rate under different coal gasification slag dosages

适宜的坍落度是保障煤气化渣膏体充填工程顺利实施的前提。根据行业标准《煤矿膏体充填管道输送工艺要求》(NB/T 10726—2021)[15],煤矿膏体充填材料的坍落度宜控制在 20～28 cm。由图 2 可知,绝大多数煤气化渣掺量下的膏体充填材料具有良好的流动性,其坍落度稳定处于 20～28 cm 的标准范围内,仅 1.2%、6.1%、13.2%掺量的试样不满足标准要求。符合标准的坍落度可使膏体材料在充填过程中能够顺利输送到指定位置,均匀填充采空区,有效降低因材料堆积不均而导致的地表变形风

险。同时,避免因材料流动性不足而需要进行过度振捣或额外加水调整性能,以显著减少施工过程中的噪声污染与水资源消耗。均匀的充填体能更好地支撑上覆岩层,降低地表塌陷概率,保护地表生态环境与建筑物等基础设施。

2.2.2 力学性能对标

根据膏体充填材料通用技术要求[16],膏体充填体的 8 h 抗压强度应大于 0.1 MPa。如图 4 所示,1.2%、1.8%和 2.3%掺量的煤气化渣膏体充填材料未达到该要求。8 h 强度达标可使充填体在较短时间内具备初始承载能力,保障充填体在自身重力及顶板压力作用下不发生明显变形或坍塌,实现采空区快速充填接顶,有效防止地表沉陷,保护地表生态环境和建筑物安全。若早期强度不足,充填体易发生变形、开裂甚至垮塌,无法有效支撑顶板及填充采空区,不仅难以起到控制地表沉陷的作用,还可能导致充填体内部结构疏松,存在较多孔隙和裂隙,进而容易导致充填体中的水分渗漏,既影响充填体的固化效果,又存在污染地下水资源的潜在风险。

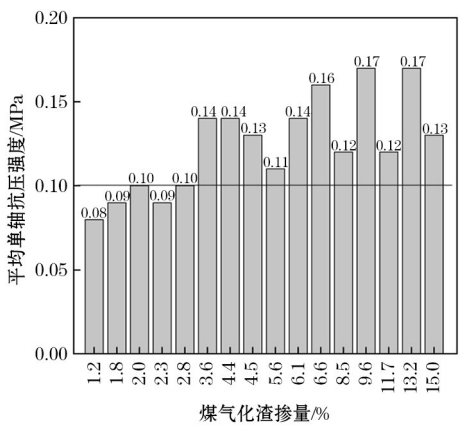


图 4 不同煤气化渣掺量下 8 h 龄期充填体的平均单轴抗压强度

Fig.4 Average uniaxial compressive strength of backfill at 8 h age under different coal gasification slag dosages

根据《煤矿安全规程》第一百五十六条规定,采场充填体抗压强度最低应≥0.8 MPa,这是保障采空区稳定性的强制性要求。国内多数煤矿要求膏体充填体 28 d 抗压强度≥5.3 MPa[17]。由图 5 可知,多数煤气化渣掺量下 28 d 龄期充填体的平均单轴抗压强度高于 5.3 MPa,表明煤气化渣膏体充填体经充分凝结硬化后,具备优异的长期稳定性和承载能力。良好的力学性能可有效支撑地层,防止地表下沉和变形,保护地表的生态环境和基础设施安全。同时,能够满足大多数中等荷载条件下的矿山充填工程需求,维持矿山开采的安全。

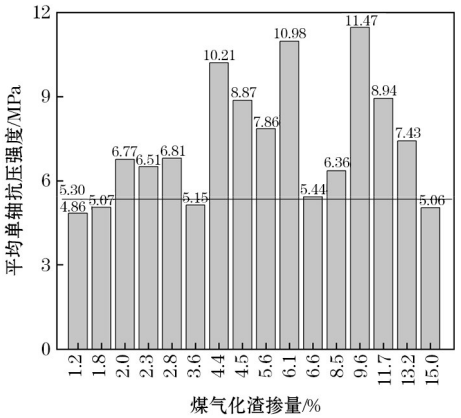


图 5 不同煤气化渣掺量下 28 d 龄期充填体的平均单轴抗压强度

Fig.5 Average uniaxial compressive strength of backfill at 28 d age under different coal gasification slag dosages

2.3 充填材料性能极差分析

极差分析可量化各因素对煤气化渣膏体充填材料性能的影响程度。试验中以因素 A(渣膏比)、B(灰掺比)、C(料浆质量浓度)为横坐标,各项指标平均值 m_i(第 i 组试验的材料配比系数,无量纲,$i=1,2,3,4$,分别对应 4 组试验)为纵坐标,绘制因素-指标水平趋势图,直观揭示各个指标随因素水平的变化规律。表 4 为膏体坍落度和泌水率极差分析表。

(1) 由坍落度的极差 R 可知,各因素对坍落度的影响程度由高到低依次是 A、B、C,即渣膏比是影响坍落度的最主要因素,其次为灰掺比,浆料的质量浓度影响最小。

(2) 由泌水率的极差 R 可知,各因素对泌水率的影响程度由高到低依次为 A、B、C,即渣膏比同样是影响泌水率的最主要因素,其次是灰掺比,浆料的质量浓度影响最小。

表 4 膏体坍落度和泌水率极差分析

Table 4 Range analysis of paste slump and bleeding rate

m_i 和 R 值	坍落度/cm			泌水率/%		
	A	B	C	A	B	C
m_1	24.18	22.13	23.23	2.50	2.13	2.31
m_2	27.10	24.55	23.70	2.50	2.12	2.12
m_3	20.38	23.53	24.20	1.94	2.60	2.14
m_4	22.68	24.13	23.20	2.22	2.30	2.59
极差 R	6.72	2.42	1.00	0.56	0.48	0.47
主次因素	$A-B-C$			$A-B-C$		

8 h、7 d、14 d 充填体抗压强度极差分析情况见表 5。

(1) 由 8 h 强度的极差 R 可知,各因素对 8 h 单轴抗压强度的影响程度由高到低依次是 A、B、C,即 8 h 强度的主要影响因素是渣膏比。

(2) 由 7 d 和 14 d 强度的极差 R 可知,各因素对中期强度的影响程度由高到低依次是 C、B、A,即 7 d 和 14 d 强度的主要影响因素都是浆料的质量浓度。

表 5 8 h、7 d、14 d 充填体抗压强度极差分析

Table 5 Range analysis of compressive strength of backfill at 8 h, 7 d, and 14 d

m_i 和 R 值	8 h 强度			7 d 强度			14 d 强度		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
m_1	0.12	0.10	0.13	2.72	2.95	3.04	4.9	5.58	6.11
m_2	0.16	0.13	0.12	3.01	2.24	3.38	5.64	4.63	6.51
m_3	0.13	0.13	0.12	3.42	3.94	2.86	6.52	6.55	5.13
m_4	0.09	0.14	0.13	2.92	2.92	2.78	5.13	5.44	4.45
极差 R	0.07	0.04	0.01	0.70	1.70	0.60	1.62	1.92	2.06
主次因素	$A-B-C$			$C-B-A$			$C-B-A$		

由表 6 中 3 d 和 28 d 强度的极差 R 可知,各因素对单轴抗压强度的影响程度由高到低依次为 B、A、C,即主要影响因素都是灰掺比。

表 6 3 d、28 d 充填体抗压强度极差分析

Table 6 Range analysis of compressive strength of backfill at 3 d and 28 d

m_i 和 R 值	3 d 强度			28 d 强度		
	A	B	C	A	B	C
m_1	1.21	1.81	1.84	7.06	7.02	7.58
m_2	1.32	1.36	2.08	8.30	5.50	8.24
m_3	2.06	1.69	1.37	8.21	9.35	6.98
m_4	1.68	1.42	0.99	5.88	7.57	6.63
极差 R	0.85	0.45	1.09	2.42	3.85	1.61
主次因素	$B-A-C$			$B-A-C$		

为更直观形象地明确各项指标随各因素的总体变化趋势,绘制了各因素对不同考察指标影响的水平趋势图,如图 6 至图 12 所示,图中横坐标为因素水平,纵坐标为对应指标的平均值。

膏体材料配比优化试验中,某一单项指标无法全面评价材料的工程适用性,各指标间的重要性程度不同,且各因素对不同指标的影响规律存在差异,因此多指标试验的结果分析需进行系统权衡。采用综合平衡法分析多指标正交试验。首先对坍落度、泌水率及各龄期抗压强度分别进行单指标的直观分析,明确每个指标的影响因素主次顺序和最佳水平组合;在此基础上,结合煤矿膏体充填工程的技术要求与现场施工条件,对各指标的分析结果进行综合比较和分析,得出较优方案。具体平衡过程如下。

(1) 因素 A(渣膏比)。从早期充填体单轴抗压强度要求出发,按照膏体充填材料特性要求,8 h 抗压强度需大于 0.1 MPa,渣膏比为 0:4 的膏体材料不满足要求,予以排除。当渣膏比为 2.5∶1.5、2∶2、1∶3,养护龄期为 28 d 时,大多数试样强度>3.8 MPa,满足工程要求,泌水率也符合材料特性要求;但从坍落度指标看,渣膏比为 1∶3 和 2∶2 时,部分试验的坍落度不满足要求,因此选择最佳的渣膏比为 2.5∶1.5。

(2) 因素 B(灰掺比)。从单轴抗压强度方面考虑,灰掺比为 3∶1 和 2.5∶1.5,养护龄期在 8 h 时,部分试样强度低于 0.1 MPa,予以排除。从坍落度指标看,灰掺比为 2∶2 时的坍落度优于 1.5∶2.5,因此灰掺比取 2∶2。

(3) 因素 C(质量浓度)。按照充填材料的特性要求,在浆料质量浓度为 76%时,坍落度均位于 20~28 cm 标准范围内,且各项输送性能相对较优,因此选取质量浓度为 76%。

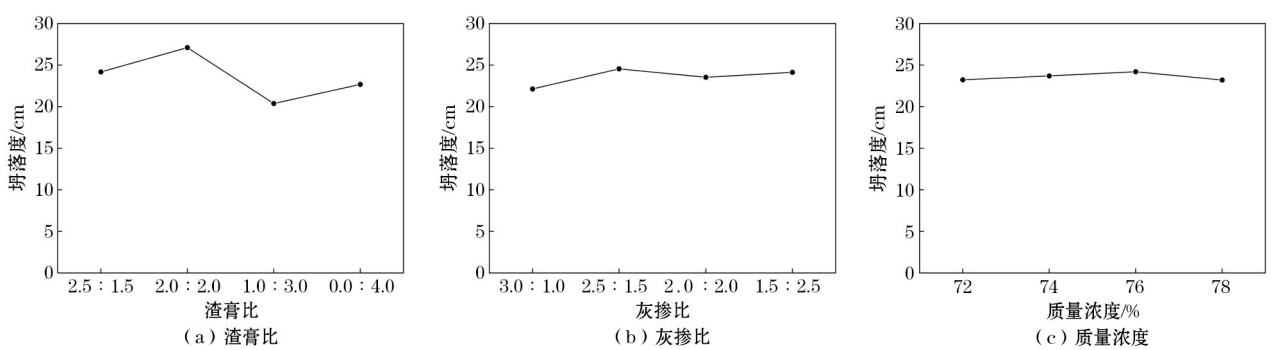


图 6 膏体坍落度与各因素水平趋势

Fig.6 Trend of paste slump with each factor level

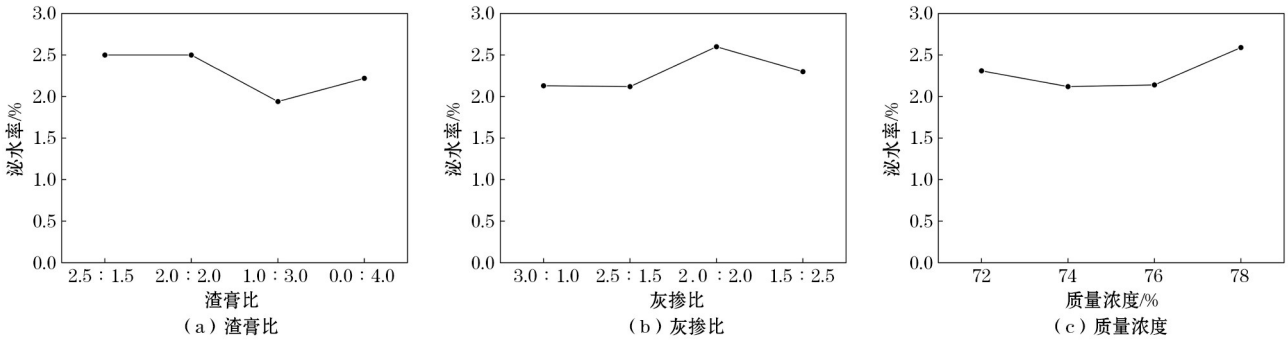


图 7　膏体泌水率与各因素水平趋势

Fig.7　Trend of paste bleeding rate with each factor level

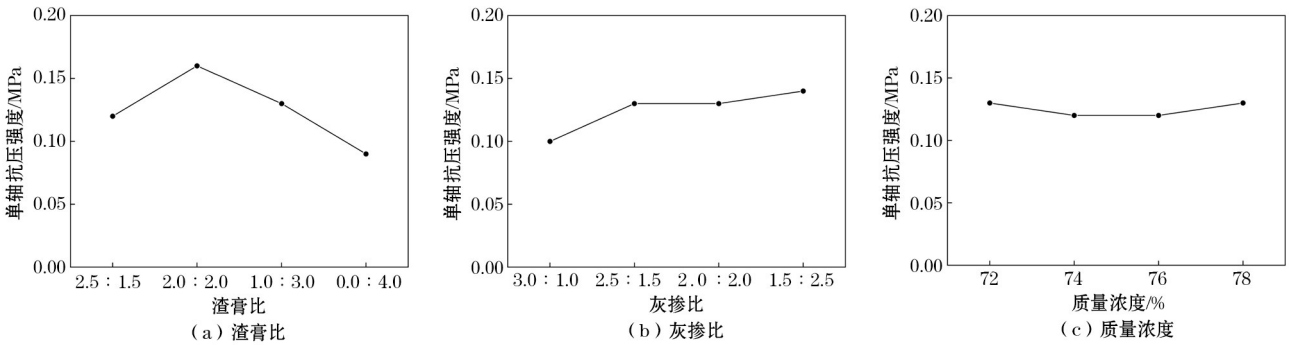


图 8　充填体 8 h 单轴抗压强度与各因素水平趋势

Fig.8　Trend of 8 h uniaxial compressive strength of backfill with each factor level

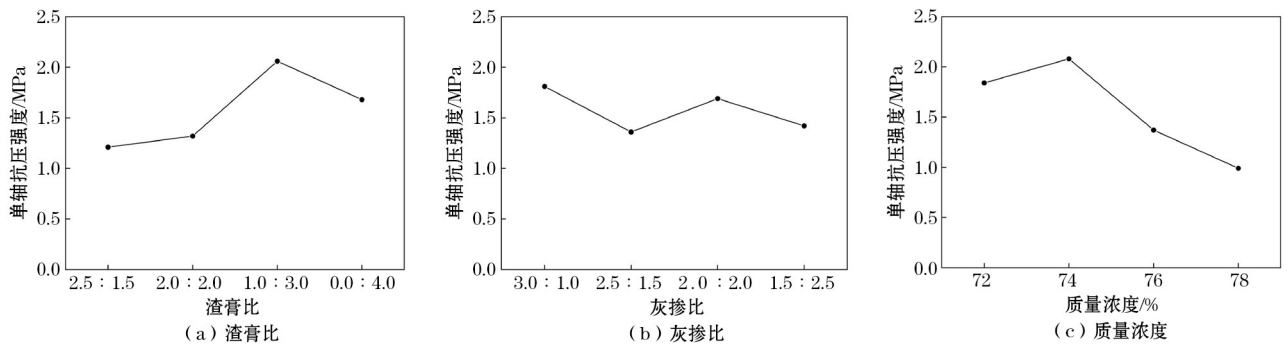


图 9　充填体 3 d 单轴抗压强度与各因素水平趋势

Fig.9　Trend of 3 d uniaxial compressive strength of backfill with each factor level

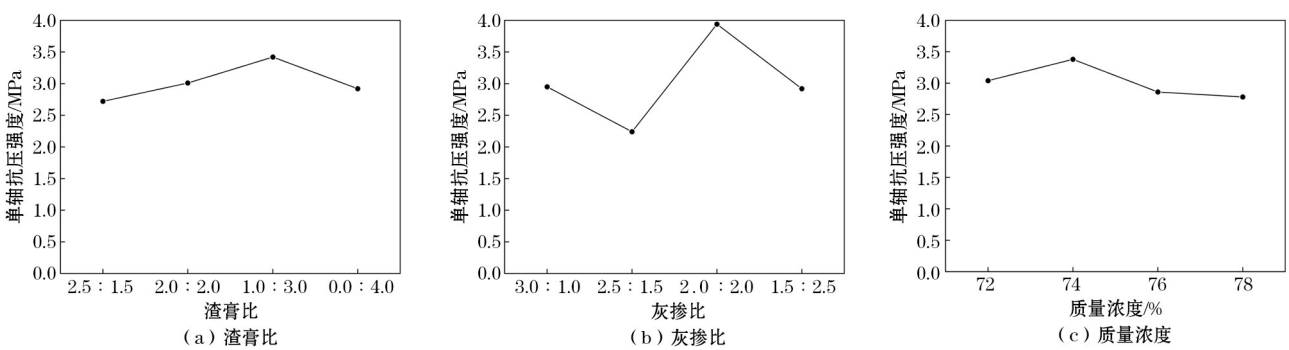


图 10　充填体 7 d 单轴抗压强度与各因素水平趋势

Fig.10　Trend of 7 d uniaxial compressive strength of backfill with each factor level

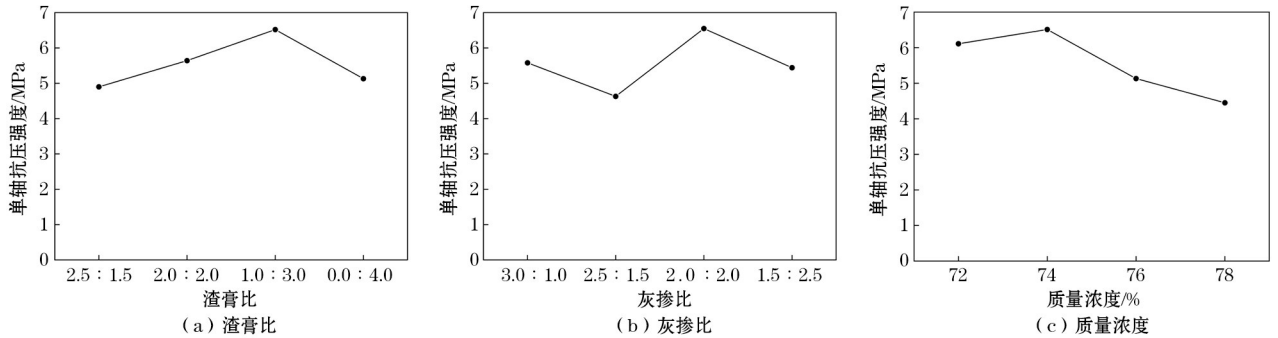


图 11 充填体 14 d 单轴抗压强度与各因素水平趋势

Fig.11 Trend of 14 d uniaxial compressive strength of backfill with each factor level

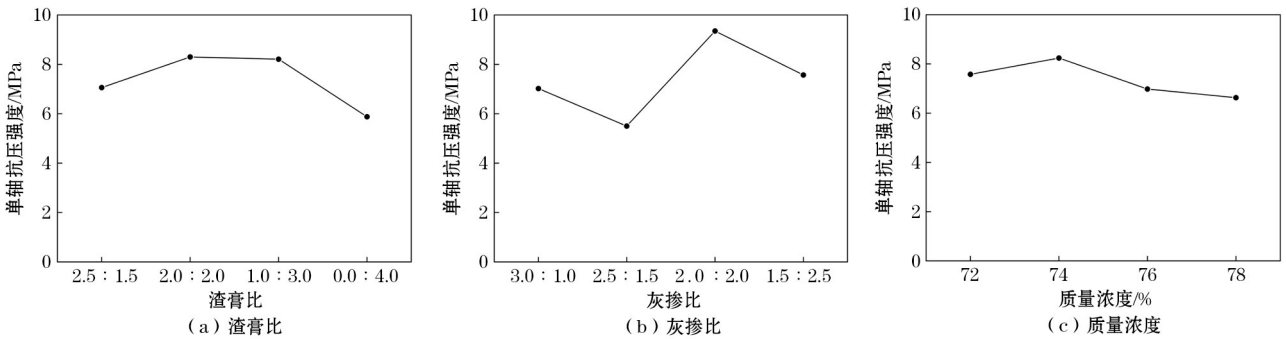


图 12 充填体 28 d 单轴抗压强度与各因素水平趋势

Fig.12 Trend of 28 d uniaxial compressive strength of backfill with each factor level

综上,煤气化渣膏体充填材料最优配比为:渣膏比 2.5∶1.5、灰掺比 2∶2、浆料质量浓度 76%,对应煤气化渣掺量为 11.7%的试验组。该配比的膏体充填材料其工作性能完全满足坍落度和泌水率的施工要求。从抗压强度的分析可知,其既能满足早期强度的要求,又能实现后期强度的稳定增长,因此可作为本次试验的最优配比结果。

3 充填材料对地下水水质的影响及经济效益分析

3.1 浸出液重金属离子变化分析

本研究聚焦于煤气化渣、水泥、粉煤灰等原材料经配比混合后,在水化硬化过程中逐步形成膏体充填体的完整过程,重点揭示成型后的膏体充填体浸出液在性质、成分层面的演变规律。

研究中侧重考查原材料间的物理化学反应与组分协同作用对浸出液酸碱度、重金属离子浓度及有害化学成分含量的影响,旨在阐明膏体充填体与环境介质间的物质交换机制。重金属本底含量主要反映原材料的自身固有属性,其与膏体水化硬化过程中材料间相互作用对浸出液的影响关联性较弱,属独立研究范畴,故未将其纳入本次研究的内容。通过分析充填体试样浸出液中各检测指标含量或浓度随时间的变化规律,系统评估膏体充填体试样对地下水水质的潜在影响情况,各项检测指标的动态变化趋势如图 13 所示。

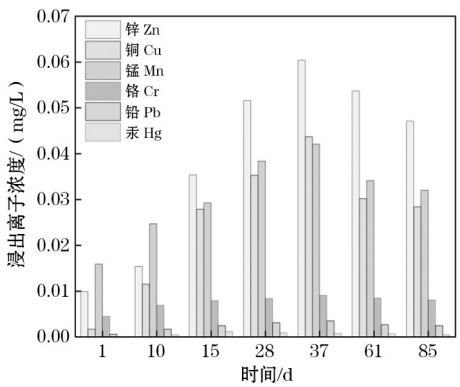


图 13 浸出液重金属离子变化趋势

Fig.13 Trend of heavy metal ion concentrations in leachate

3.2 基于 *F* 值法的地下水水质评价

F 值可定量表征水体污染程度,便于对比分析同一水体在不同时期的污染状况,能为环境管理与决策提供明确依据,适用于煤气化渣膏体充填材料

浸出液的评价[18-20]。依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)规定的各类指标分级标准,将各指标实际检测值与对应标准值进行对比,确定单项组分所属的质量类别(分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类)。计算步骤如下。

(1) 单项组分判定:根据规范中地下水质量分类指标,确定各单项组分所属质量类别。

(2) 确定评分分值:根据各组分质量类别,确定其评价分值 F_i(共设Ⅴ类),各类别分值见表 7。

表 7 地下水各类别评价分值

Table 7 Evaluation scores for various groundwater categories

类别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
F_i	0	1	3	6	10

(3) 计算综合分值 F:

$$\overline{F}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}F_i \tag{1}$$

$$F=\sqrt{\frac{\overline{F}^2+F_{\max}{}^2}{2}} \tag{2}$$

式中:$\overline{F}$ 为各单项组分评分值 F_i 的算术平均值;$F_{\max}$ 为单项组分评分值 F_i 的最大值;n 为单项组分项数。

(4) 水质等级划分:根据计算得到的 F 值,参考地下水质量等级划分标准(见表 8),划分水质级别,表中范围用数学区间表示。

表 8 地下水质量分级

Table 8 Groundwater quality classification

级别	优良	良好	较好	较差	极差
F	(0,0.8]	(0.8,2.5]	(2.5,4.25]	(4.25,7.2]	(7.2,+∞)

利用 F 值法对浸泡不同时间的浸出液进行污染综合评价,煤气化渣浸泡水质评价结果见表 9 至表 10。

表 9 各类 F 值和总硬度

Table 9 Various F values and total hardness

时间/d	级别	F	$F_{\max}$	$\overline{F}$	F^-/(mg/L)	总硬度/(mg/L)
1	优良	0.72	1	0.22	0	1
10	良好	0.85	1	0.67	0	1
15	良好	2.29	3	1.22	0	3
28	良好	2.24	3	1.00	0	3
37	良好	2.24	3	1.00	0	3
61	良好	2.24	3	1.00	0	3
85	良好	0.85	1	0.67	0	1

表 10 重金属元素具体含量

Table 10 Specific contents of heavy metal elements

时间/d	重金属含量/(mg/L)						
	锌 Zn	铜 Cu	锰 Mn	铬 Cr	镉 Cd	铅 Pb	汞 Hg
1	0	0	0	0	0	0	1
10	0	1	0	1	0	0	3
15	0	1	0	1	0	0	6
28	1	1	0	1	0	0	3
37	1	1	0	1	0	0	3
61	1	1	0	1	0	0	3
85	0	1	0	1	0	0	3

从表 9、表 10 中可以看出,浸泡第 1 天的 F 值为 0.72,水质等级处于“优良”级别;随着浸泡时间的延长,F 值在第 10 天上升到 0.85,水质等级转为“良好”,此时地下水水质受煤气化渣充填体浸泡的影响较小。第 15 天、28 天、37 天、61 天期间,F 值基本稳定在 2.24 左右,表明随着浸泡时间推移,煤气化渣中可能有更多物质溶出,对地下水水质产生了一定影响,但尚未达到较差的程度。

综上,F 值的变化反映了地下水质在浸泡过程中的动态变化规律:前期与后期水质相对较好,中间阶段略有变差,但仍在“良好”范围内。在不同煤气化渣充填体浸泡天数下,地下水质量的综合评价级别主要以“良好”为主;尽管随着浸泡天数的增加地下水质量有所下降,但整体仍处于相对较好的状态。

3.3 经济效益分析

本试验所用煤气化渣取自陕西省榆林市某企业,粉煤灰取自某发电厂,煤矸石为榆林某矿产生的固体废弃物。与传统膏体充填材料相比,该材料综合成本降低了16%,且材料力学性能与工作性能显著提高,性价比优异。同时,该材料还可大宗消纳工业固废,通过跨行业合作实现成本降低与环境保护。目前,中国粉煤灰的综合利用率约为 68%~70%,有效缓解了固体废物大量堆积造成的土地占用问题,降低了固体废物对环境和人体造成的危害。此外,采用碳钢替代水泥、氢氧化钠、水玻璃等传统碱性活化剂,可进一步降低生产成本,减少传统活化剂在生产过程中对环境造成的潜在危害。综上所述,煤气化渣膏体充填材料实现了固废资源化利用率与经济效益的协同提升。

4 结论

(1) 通过与现行行业标准规范对标分析及极差

分析,确定了煤气化渣膏体充填材料的最优配比为:渣膏比 2.5∶1.5、灰掺比 2∶2、浆料质量浓度 76%,煤气化渣掺量为 11.7%。

(2) 浸出液各项指标在浸泡后期趋于稳定平衡,且全部符合地下水质量基本要求,未超过Ⅲ类水质标准,可有效保障地下水的水质安全,保证充填体在水环境中的稳定性和可靠性。

(3) 采用 F 值法对煤气化渣膏体充填材料不同时期的浸泡水质进行评价,地下水质量的综合评价级别以"良好"为主,随着浸泡天数的增加,地下水质量略有下降,但整体仍处于相对较好的状态。煤气化渣膏体充填材料的成本相较于传统充填材料降低 16%,具有优异的工程应用价值与经济效益。

参考文献(References):

[1] 武强,涂坤,曾一凡,等.打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J].煤炭学报,2019,44(6):1625-1636.
Wu Qiang, Tu Kun, Zeng Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(6):1625-1636.

[2] 李臣,陈团团,刘伟,等.未来矿山绿色高质量发展顶层规划设计研究[J].矿业安全与环保,2024,51(5):168-174.
Li Chen, Chen Tuantuan, Liu Wei, et al. Study on top-level planning and design of green and high-quality development of future mines[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2024,51(5):168-174.

[3] 武强,涂坤,曾一凡."双碳"目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.
Wu Qiang, Tu Kun, Zeng Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin,2023,68(15):1884-1898.

[4] 刘具,秦坤.我国煤炭绿色开采技术进展[J].矿业安全与环保,2023,50(6):7-15.
Liu Ju, Qin Kun. Progress of green coal mining technology in China[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2023,50(6):7-15.

[5] 李海潮.煤气化渣替代细骨料对道路用砂浆力学性能的影响[J].洁净煤技术,2025,31(增刊 1):669-675.
Li Haichao. Impact of coal gasification slag as a substitute for fine aggregate on mechanical properties of road mortar[J]. Clean Coal Technology,2025,31(Suppl.1):669-675.

[6] Liu Xiaodong, Jin Zhengwei, Jing Yunhuan, et al. Review of the characteristics and graded utilisation of coal gasification slag[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2021,35(7):92-106.

[7] Miao Zekai, Xu Jie, Chen Liqing, et al. Hierarchical porous composites derived from coal gasification fine slag for CO2 capture: Role of slag particles in the composites[J]. Fuel,2022,309:122334.

[8] 余其俊,成立,赵三银,等.水泥和粉煤灰中重金属和有毒离子的溶出问题及思考[J].水泥,2003(1):8-15.
Yu Qijun, Cheng Li, Zhao Sanyin, et al. The problem and reflection on the leaching of heavy metals and toxic ions in cement and fly ash[J]. Cement,2003(1):8-15.

[9] 王希梅,张永波.粉煤灰浸出特性及其贮放对地下水环境的影响[J].山西水利,2007(1):89-90+111.
Wang Ximei, Zhang Yongbo. The leaching characteristics of fly ash and its impact on groundwater environment during storage and release[J]. Shanxi Water Resources,2007(1):89-90+111.

[10] 王正辉,刘小刚,马龙.矿坑废水用于胶结充填的试验研究[J].矿业研究与开发,2012,32(5):50-52+90.
Wang Zhenghui, Liu Xiaogang, Ma Long. Experimental study of using mine waste water for cemented filling[J]. Mining Research and Development,2012,32(5):50-52+90.

[11] 何丽君,张昊颖,马新青,等.煤气化粗渣重金属形态及充填浸出行为[J].化工进展,2025,44(12):7299-7307.
HE Lijun, ZHANG Haoying, MA Xinqing, et al. Speciation and leaching behavior of heavy metals in coal gasification coarse slag for backfilling[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2025,44(12):7299-7307.

[12] 贾建丽,吴昱,曹金胜,等.煤气化粗渣模拟淋滤液中砷的人体健康风险及其在地下水环境中的安全阈值[C]//中国煤炭学会.中国煤炭学会首届煤炭行业青年科学家论坛论文摘要集.北京:[出版者不详],2014:71.
Jia Jianli, Wu Yu, Cao Jinsheng, et al. Human health risk of arsenic in simulated leachate of coal gasification coarse slag and its safety threshold in groundwater environment[C]//China Coal Society. Abstract Collection of Papers from the First Young Scientists Forum in the Coal Industry of the China Coal Society. Beijing:[s.n.],2014:71.

[13] 刘音,张海云,王其锋,等.建筑垃圾膏体充填材料对地下水水质影响研究[J].矿业研究与开发,2014,34(7):85-88+99.
Liu Yin, Zhang Haiyun, Wang Qifeng, et al. Study on the effect of construction waste filling material on ground water quality[J]. Mining Research and Development,2014,34(7):85-88+99.

[14] GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S].

[15] NB/T 10726—2021 煤矿膏体充填管道输送工艺要求[S].

[16] GB/T 39489—2020 全尾砂膏体充填技术规范[S].

[17] 李绪萍,林庆博,张金山.煤矿采空区膏体充填材料制备试验研究[J].中国煤炭,2020,46(8):96-99.
Li Xuping, Lin Qingbo, Zhang Jinshan. Experimental study on paste filling material preparation in coal mine goaf[J]. China Coal,2020,46(8):96-99.

[18] 张晓叶,张永祥,任仲宇,等.不同地下水水质评价方法的比较及实例应用[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):98-101.
Zhang Xiaoye, Zhang Yongxiang, Ren Zhongyu, et al. Comparison and practical example of assessment method in different groundwater qualities [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2014,25(2):98-101.

[19] 陈武,艾俊哲,李凡修,等.地下水水质综合评价方法探讨[J].地下水,2002(2):74-91.
Chen Wu, Ai Junzhe, Li Fanxiu, et al. Exploration of comprehensive evaluation method for groundwater quality [J]. Ground Water,2002(2):74-91.

[20] 李鹏.煤生物成气过程中有机物及重金属变化特征及其潜在环境风险[D].焦作:河南理工大学,2019.
Li Peng. Variable characteristics and potential environmental risk of organic and heavy metals in the process of coal gasification by microorganism [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University,2019.