



采选冶化固废基充填材料制备及综合性能研究综述

张钦礼 陶云波 冯岩 陈秋松 高凌志 张芋杰 王道林

引用本文:

张钦礼, 陶云波, 冯岩, 等. 采选冶化固废基充填材料制备及综合性能研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 65–81.
ZHANG Qinli, TAO Yunbo, FENG Yan. Review on preparation and comprehensive performance research of cemented paste backfill for solid waste from mining, beneficiation, metallurgy and chemical industries[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 65–81.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0509>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含钙镁煤基固废CO₂矿化封存及其产物性能研究进展

Research progress on CO₂ mineralization of coal-based solid waste containing calcium and magnesium and its product performance
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 301–315 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0902>

建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践

Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 83–92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0188>

煤基固废充填料浆长距离输送悬浮态稳定性研究

Study on suspension state stability of coal-based solid waste filling slurry of long-distance pipeline transportation
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 444–456 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0104>

煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术

Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’ in coal power base
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 69–82 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0129>

煤基固废矿化封存CO₂技术研究进展

Research progress of CO₂ storage technology by mineralization of coal-based solid waste
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 309–328 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0988>

煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势

Resource utilization status and development trend of bulk solid waste of coal-based ash/slag
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 238–252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1102>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张钦礼,陶云波,冯岩,等.采-选-冶-化固废基充填材料制备及综合性能研究综述[J].煤炭科学技术,2025,53(6):65-81.

ZHANG Qinli, TAO Yunbo, FENG Yan, *et al.* Review on preparation and comprehensive performance research of cemented paste backfill for solid waste from mining, beneficiation, metallurgy and chemical industries[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 65-81.

采-选-冶-化固废基充填材料制备及综合性能研究综述

张钦礼¹,陶云波¹,冯岩¹,陈秋松²,高凌志¹,张芋杰¹,王道林¹

(1.中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083;2.北京科技大学资源与安全工程学院,北京100083)

摘要:固废基胶结充填技术作为实现绿色矿山建设与工业固废协同处置的核心载体,其材料设计与性能调控已成为矿业工程领域的研究热点。针对采-选-冶-化多源工业固废(采掘废石、选矿尾砂、冶金炉渣、化工废料等)物化特性差异显著导致的充填体性能离散化问题,系统综述了多源固废在充填材料中的角色差异,以及不同固废基充填材料在流变、强度、环境方面的综合性能。主要包括:系统综述了不同工业固废基充填材料的来源、性能及用途,发现典型工业固废(尾砂、钢渣、粉煤灰等)的化学组分呈现显著互补性, SiO_2 、 CaO 和 Al_2O_3 的梯度分布为协同胶凝提供了物质基础;总结了不同工业固废基充填材料的流变性能、管输阻力计算方式、强度分布及优化手段,分析了固废基充填材料的屈服应力、黏度及抗压强度的分布范围及规律,发现粒径级配优化与聚羧酸减水剂的复合调控可有效降低管道输送阻力,选用恰当的激发剂和辅助胶凝材配比可有效提高充填体强度;评价了固废基充填材料在不同时间尺度下的环境污染风险,系统梳理了固废基充填材料中有害元素的浸出机制和固化机制,总结了矿山充填污染治理现状,发现提高固废基充填材料的水化反应进程和添加多孔物质可有效控制污染元素的扩散。研究成果对于推动采-选-冶-化行业的可持续发展、缓解固废处置压力、提升资源综合利用率以及促进绿色矿山建设具有重要意义。

关键词:多源工业固废;固废基充填材料;流变与管输;强度性能;环境影响

中图分类号:X705;TD82

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2025)06-0065-17

Review on preparation and comprehensive performance research of cemented paste backfill for solid waste from mining, beneficiation, metallurgy and chemical industries

ZHANG Qinli¹, TAO Yunbo¹, FENG Yan¹, CHEN Qiusong², GAO Lingzhi¹, ZHANG Yujie¹, WANG Daolin¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: As the core carrier for realizing the construction of green mines and co-disposal of industrial solid wastes, solid waste-based cemented paste backfill (SCPB) technology has become a hot research topic in the field of mining engineering in terms of material design and performance regulation. Aiming at the problem of discrete performance of SCPB caused by the significant difference in physical and chemical properties of industrial solid wastes from multiple sources (waste rock from mining, tailings from mineral processing, metallurgical slag, chemical wastes, etc.), the differences in the roles of solid wastes from multiple sources in the backfill materials and the comprehensive performance of different SCPB in terms of rheology, strength, and environmental aspects are systematically reviewed. It mainly includes: A systematic review was conducted on the sources, properties and uses of different SCPB. It was found that the chemical components of typical industrial solid wastes (tailings, steel slag, fly ash, etc.) exhibit significant complementarity, and the gradient distribution of SiO_2 , CaO , and Al_2O_3 provides a material basis for synergistic coagulation; The rheological properties, calculation of pipeline resist-

收稿日期:2025-04-14

策划编辑:朱恩光

责任编辑:宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2025-0509

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项资助项目(2024ZD1003702);贵州省重大专项资助项目(黔科合重大专项字[2024]017);博士后创新人才支持计划资助项目(BX20250036)

作者简介:张钦礼(1965—),男,山东临朐人,教授,博士生导师,博士。E-mail: zhanqinlign@126.com

通讯作者:王道林(1994—),男,河南信阳人,博士。E-mail: daolinw@csu.edu.cn

ance, strength distribution and optimization means of different SCPB were systematically summarized, and the distribution ranges and laws of the yield stress, viscosity and compressive strength of SCPB were analyzed. It was found that the composite control of particle size grading optimization and polycarboxylate water reducing agent can effectively reduce pipeline transportation resistance. Selecting appropriate activator and auxiliary cementitious material ratios can effectively improve the strength of the SCPB; This study evaluated the environmental pollution risk of SCPB in different time scales, systematically sorted out the leaching mechanism and solidification mechanisms of harmful elements in SCPB, and summarized the current situation of mine backfill pollution control. It was found that improving the hydration reaction process of SCPB and adding porous materials can effectively control the diffusion of pollutants. The research results are of great significance in promoting the sustainable development of the mining, processing, metallurgy and chemical industries, alleviating the pressure of solid waste disposal, improving the comprehensive utilization rate of resources and promoting the construction of green mines.

Key words: multi-source industrial solid waste; solid waste-based cemented paste backfill; rheology and pipeline transportation; strength performance; environmental impact

0 引 言

随着全球各国对战略性矿产资源需求的持续攀升,谁控制了战略性矿产,谁就控制了经济发展的主动权,也就控制了未来高端产业发展的优先权^[1]。但在“双碳”目标与资源需求的双重驱动下,矿产资源正深陷环境承载能力不足与资源开采速度过快的博弈之中。尤其在各类矿产资源开采量攀升的同时,大量伴生固废的产生已成为矿业领域亟待解决的棘手难题。采矿业作为全球最大固废生产者,年产出固体废弃物 50 亿~70 亿 t^[2]。传统的固废处理方式为堆存、填埋,不仅占用大量的土地资源,经过风吹雨淋可能造成周边土地重金属污染^[3]。此外,随着资源的日益枯竭和环境保护的日益严格,寻求固废综合利用的途径成为了亟待解决的重大环境和社会问题。充填采矿法凭借在资源绿色开发与固废综合处置方面的卓越优势,成为国家在推进以采掘废石、选矿尾砂、冶炼渣化工副产石膏等为代表的采-选-冶-化等不同工艺环节与领域的工业大宗固废规模化处置与利用的一把“利器”^[4-5]。固废基充填技术以在采-选-冶-化等不同工艺环节排出的固废作为充填原材料,通过添加胶凝材料或外加剂(碱激发剂、减水剂)等,加水搅拌后,管输送至地下采空区实现地压管控和固废处置^[6-7]。作为规模化处置固废的重要途径,固废基充填对于矿业的高质量发展、环境友好型产业发展具有重要意义^[8-9]。虽然充填采矿法在满足矿山开采技术要求的同时,实现了废弃物的资源化利用。然而,由于固废的物化性质复杂,致使固废基充填在实施过程中面临诸多挑战,包括了力学性能、流变性能、耐久性及环境影响等方面的综合问题。因此,如何通过科学的制备工艺和合理的配比,充分发挥固废材料的性能,使其满足管道输送、地压管控和环境保护的要求,成为当前研究的热点和难点。

为此,笔者展开了采-选-冶-化固废基充填性能调控与治理的研究进展分析,旨在展示固废充填技术的发展成果,为大宗固废的规模化处理应用和未来研究提供参考,主要包括:固废基充填材料的应用现状、管道输送、强度性能、环境影响等。

1 固废基充填材料

1.1 充填骨料

充填骨料的选择主要取决于矿山开采的具体要求和矿山固废的特点,常见的固废基充填骨料分为化工矿山、金属矿山、煤矿(图 1)。化工矿山以磷石膏、萤石矿尾砂等为主。金属矿山以选矿副产品尾砂为主,主要包括铁矿尾砂、金矿尾砂、钨矿尾砂等。煤矿主要以煤矸石为固体废弃物。多数矿山根据因地制宜的原则,选择经济输送半径以内或相邻的工业固废作为充填骨料,实现废弃物处理和采矿地压治理。

1.2 充填胶凝材料

目前,以工业固废制备胶凝材料的研究分为 2 类:一是以含高活性的硅酸钙固废为主要原料制备胶凝材料,这些物料易通过物理或化学方式活化得到性能较好的胶凝材料,但掺入量较小;二是以各类活性较低的尾矿制备胶凝材料,需要配入矿渣、硅藻土等高活性的粉体材料,经济性较差。目前,矿山较为常见的固废基充填胶凝材料主要有钢渣、高炉矿渣、镍渣、锂渣、粉煤灰、煤气渣、铜渣等,其主要化学组成见表 1。

1) 钢渣。钢渣主要来源于铁水和废钢中元素氧化后形成的氧化物。目前,钢渣的生产工艺主要有 3 种:① 热闷法。将钢渣导入热闷罐中,加水冷却后利用钢渣自身的温度发生应力破碎;② 泼法。将钢渣倾倒入处置场内,在钢渣超过可淬温度时,向钢渣喷洒大量水,使得钢渣应力破碎;③ 滚筒法。将熔融

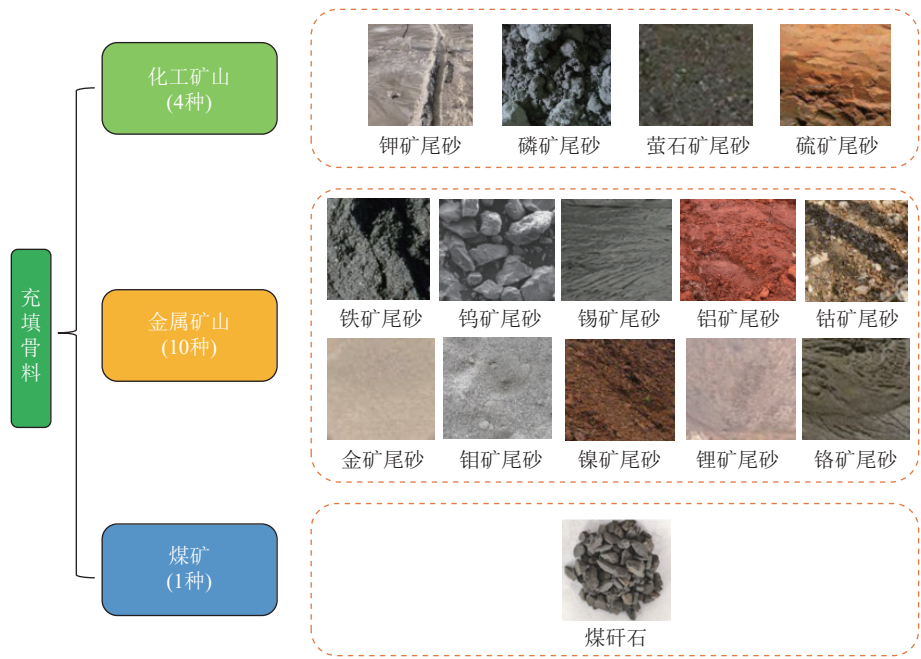


图 1 固废充填骨料分类

Fig.1 Classification of solid waste-based cemented paste backfill aggregates

表 1 固废基充填胶凝材料主要化学成分^[11, 15, 17, 22-25]

Table 1 Main chemical components of solid waste-based cemented paste backfill materials^[11, 15, 17, 22-25]

矿物	各组分质量分数/%											误差/%
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	FeO	K ₂ O	TiO ₂	
钢渣	36.77	18.57	4.22	9.24	0.43	19.85	—	4.19	—	0.27	—	0.06
高炉矿渣	35.41	33.58	15.22	8.57	1.51	0.62	—	—	—	—	—	—
镍渣	22.69	36.62	6.97	28.81	1.08	0.27	0.16	—	3.01	—	—	0.13
锂渣	22.69	36.62	28.81	1.08	0.27	0.16	3.01	—	—	6.97	—	0.26
粉煤灰-PC灰	1.1 ~ 6.6	37 ~ 58	24 ~ 37	0.4 ~ 1.5	0.4 ~ 3.0	1 ~ 7	—	—	—	—	—	4.8 ~ 8.0
粉煤灰-CFB灰	4 ~ 18	27 ~ 50	14 ~ 30	0.2 ~ 2.0	1 ~ 13	3 ~ 13	—	—	—	—	—	2.3 ~ 15.0
煤气化渣	8.65	55.30	19.14	1.14	0.66	9.79	1.45	—	—	2.44	1.16	—
铜渣	10.72	24.01	6.77	2.61	—	41.24	3.08	—	—	—	—	—

钢渣倒入滚筒中,利用水和机械力将破碎钢渣^[10]。钢渣的主要产地为大中型钢厂,其化学成分主要为CaO、Fe₂O₃、SiO₂、MgO^[11]。WEI等^[12]以钢渣、矿渣和粉煤灰的混合物为原料,制备了一种新型胶凝材料,实现了完全替代水泥。

2)高炉矿渣。在高炉冶炼生铁过程中,得到硅酸盐与硅铝酸盐为主要成分的熔融物,经过淬化成粒,即成为粒化高炉渣。主要来源于各大冶炼厂冶炼生铁时的副产物。高炉矿渣的主要化学成分为SiO₂、CaO、Al₂O₃、MgO。YANG等^[13]使用Na₂SiO₃/NaOH激发高炉矿渣与粉煤灰胶凝材料性能,用于固废基充填中,结果表明高炉矿渣可以有效提高充填体强度。

3)镍渣。镍渣通过冶炼镍金属过程中产生的熔融镍渣,经过水淬及研磨后获得。主要来源为金川集团冶炼厂。镍渣的主要化学成分为SiO₂、MgO、CaO、Al₂O₃。HE等^[14]使用Al₂O₃改性镍渣的火山灰活性,通过细化充填体结构增强镍渣基胶凝材料对细粒径尾砂胶结充填体的力学性能。

4)锂渣。锂渣通常有2种方法获得:一种采用锂辉石焙烧法制备,所得锂渣为酸法锂渣;一种为锂云母提锂渣,主要采用食盐压煮法制备,所得锂渣简称为食盐法锂渣^[15]。锂渣主要化学成分为SiO₂、Al₂O₃、CaO、K₂O。YUAN等^[16]开发了锂渣基的辅助胶凝材料,替代部分水泥作为胶凝材料胶结碎石进行充填。

5)粉煤灰。煤炭经过高温煅烧,以灰分为主的不燃物与高温烟气掺杂,在表面张力的作用下形成许多微小的球形颗粒,最终收集后即粉煤灰。根据锅炉类型可分为煤粉炉粉煤灰(PC灰)和循环流化床粉煤灰(CFB灰),主要产于各大火电厂。目前,我国粉煤灰综合利用率在 68%~70%^[17]。粉煤灰主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 。ZHANG 等^[18]使用粉煤灰制备充填材料,研究表明粉煤灰可以提高料浆的流动性,延长凝固时间,提高了固废的利用率。

6)煤气化渣。煤气化渣是原煤在气化炉中与气化剂反应过程中的无机矿物和残留的碳质颗粒形成的固态残渣,主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 。据统计,2019 年,我国煤气化渣综合利用率为 8.12%。XU 等^[19]利用煤气化渣作为胶凝材料,发现煤气化渣可减少水泥的大规模应用,同时固定有害重金属元素,并一定程度提高充填体强度。

7)铜渣。铜渣是铜冶炼过程中产生的熔融铜渣,经过水淬及研磨后获得。铜渣的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 。铜渣经过改性后可以用于替代部分硅酸盐水泥^[20],如 CHEN 等^[21]采用 Na_2SO_4 和 CaO 作为碱激发剂提高改性铜渣的火山灰活性,用于辅助胶凝材料参与固废基充填,可有效提高大宗固废的综合利用。

综上所述可以看出,固废渣中的 SiO_2 质量分数分布在 12.8%~55.3%, CaO 质量分数分布在 1.10%~

42.16%, Al_2O_3 质量分数分布在 3.17%~28.81%,在充当胶凝材料方面具有广阔的应用前景。但需要注意的是,由于固废渣中的水化活性较低,通常需要采用物理或化学等复合激发手段来提高固废渣的水化活性。由此带来的能耗、碳排放、及经济成本是重点考虑的因素。且目前固废来源复杂,物化性能差异显著,盲目式粗放混合无法充分发挥固废潜力。因此,多源固废间的协同充填性能调控机制仍需进一步研究。

1.3 辅助添加材料

在固废基充填过程中,因为部分胶凝材料的水化活性较低,无法满足充填体的强度和流动性要求,因此大量学者致力于利用辅助添加材料提高固废基充填的力学和环境安全性能的研究中。目前,辅助添加材料主要有赤泥、生石灰、粉煤灰、稻壳灰等。LIU 等^[26]通过赤泥自有的碱性激发铜渣的火山灰活性,提高铜渣作为辅助胶凝材料的性能,以满足固废基充填的要求。HE 等^[27]使用生石灰作为辅助添加材料与粉煤灰混合形成胶凝材料,替代硅酸盐水泥在煤矸石充填中的应用,大幅降低了成本对充填采矿法的限制。侯春华等^[28]采用生石灰与脱硫灰渣作为复合激发剂,提高了金川矿固废基充填体的强度。WANG 等^[29]将农业固废稻壳灰与硅酸盐水泥混合制备胶凝材料,提高了固废的综合利用、优化了充填体的孔隙结构(图 2)。通过辅助添加材料的碱性或火山灰性质,提高了固废基充填体的力学性能,增加

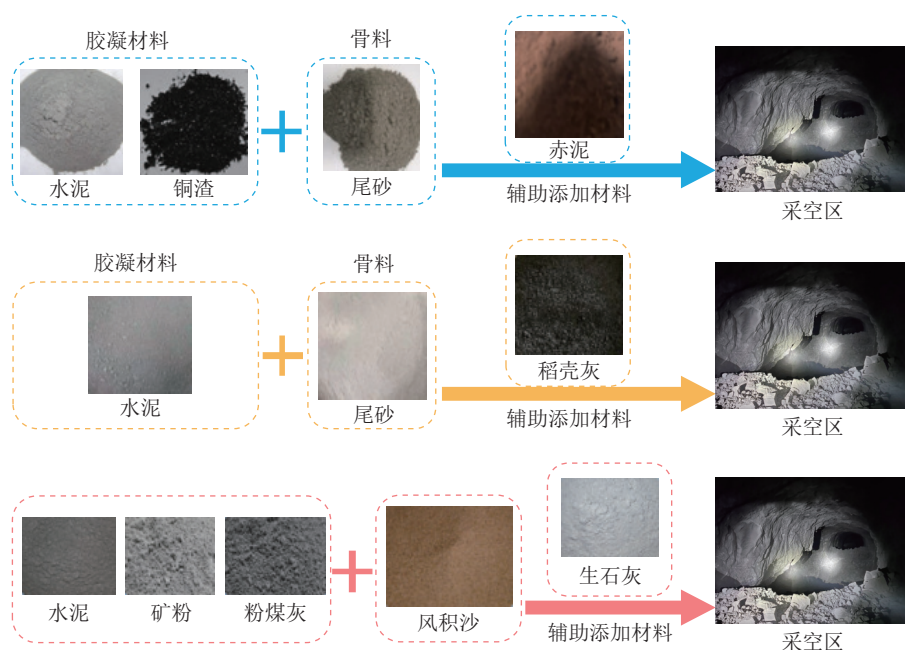


图 2 辅助添加材料在固废基充填中的应用^[26-27, 29]

Fig.2 Application of auxiliary additive materials in solid waste-based cemented paste backfill^[26-27, 29]

了大宗固废的综合利用率。综上所述可以看出,使用辅助添加材料可以有效改善充填体的力学性能、耐久性、施工性能等。辅助添加材料需具有一定碱性以实现碱激发效果,通常含有较高 CaO ,与胶凝材料混合后提高料浆的水化性能和反应效率并降低充填体孔隙率。与此同时,需要注意控制辅助胶凝材料碱性,碱性过强会提高早期强度,但是会大幅降低充填体的后期强度,因此合理的辅助添加材料比例是提高固废基充填性能的关键。

2 固废基充填材料管输性能

2.1 屈服应力分布

在充填料浆在管道输送过程中,屈服应力是影响固废基充填材料管道输送的关键参数,影响料浆

在管道中输送的阻力变化和流动的难易程度。料浆的屈服应力主要取决于料浆的质量分数、固体颗粒的形状和尺寸、固废基胶凝材料的用量、添加剂的影响等。因充填骨料性质各异及经济性要求,充填材料比例及所用胶凝材料皆因地制宜,使得固废基充填料浆的屈服应力性能各不相同。图3统计了不同固废基材料制备的充填料浆的屈服应力分布情况。可以看出,灰砂比和料浆质量分数是影响充填料浆屈服应力的关键因素,且充填料浆屈服应力与质量浓度、灰砂比呈明显正相关。另外,尾砂的颗粒、形状和粒径分布均对充填料浆的流变性能有较大影响。其次,充填料浆的屈服应力主要集中于 $60 \sim 200 \text{ Pa}$,料浆质量分数主要集中于 65% 以上,说明在该区间内,充填料浆易于输送且料浆性能稳定。

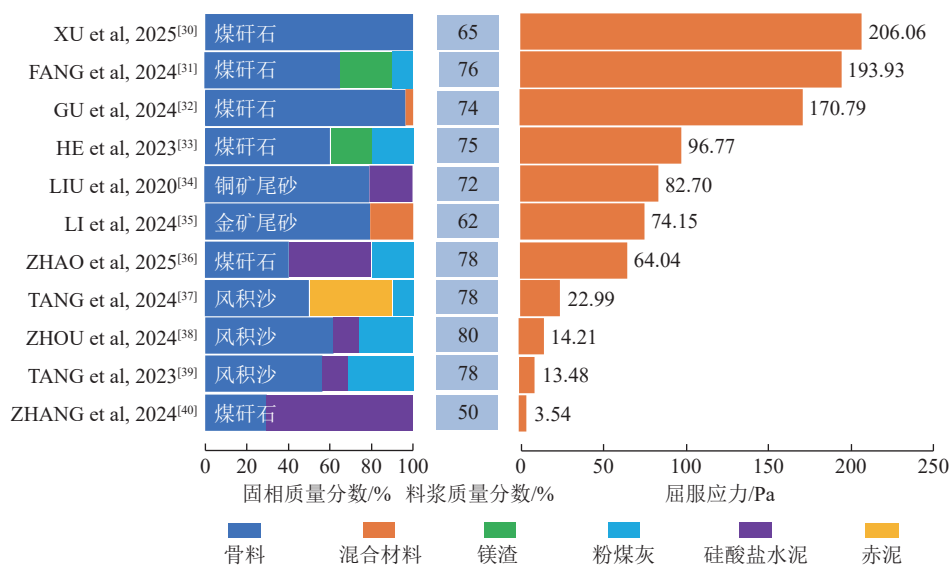


图3 固废基充填料浆管道输送的屈服应力分布

Fig.3 Yield stress distribution of solid waste-based cemented paste backfill slurry pipeline transportation

2.2 黏度区间分布

黏度是影响固废基充填管道输送的关键因素,黏度较低易于输送但存在离析风险,黏度过高则会增加管道输送的阻力,增加泵送或自流输送的难度,易发生充填堵管等。固废基充填料浆的黏度主要受到料浆质量分数、尾砂性质、胶凝材料占比等因素的影响。图4统计了不同配比、胶凝材料种类的充填料浆黏度性能,发现料浆的质量分数和胶凝材料占比是影响充填料浆黏度的主要因素。同一固相,质量分数与黏度基本呈正相关,如煤矸石充填质量分数为 50% 时黏度为 $0.61 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,质量分数为 75% 时黏度为 $2.76 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。同一质量分数,胶凝材料占比与黏度基本呈正相关,如风积沙充填胶凝材料占比由 44% 提高到 60% ,黏度由 $0.61 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 提高到

$1.06 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。此外,料浆黏度会影响管道输送的阻力和管道的磨损,因此需要综合考虑料浆的输送工况确定料浆的质量分数和配比。并在未来的研究中关注料浆黏度随剪切速率变化的规律,以及相关添加剂调控料浆流变技术,以提升充填料浆的性能和适应性。

2.3 管输阻力计算与预测

固废基充填材料管道输送过程中的阻力计算是充填系统管线布置的决定性因素。管道输送阻力越小,料浆对管道的磨损越小且越易输送,输送阻力过大则会增加管道的磨损降低管道的使用寿命,增加料浆输送的难度。目前,管道阻力计算主要有经验公式和机器学习预测法(图5)。

1)经验公式法。目前工程或研究中常见的管道

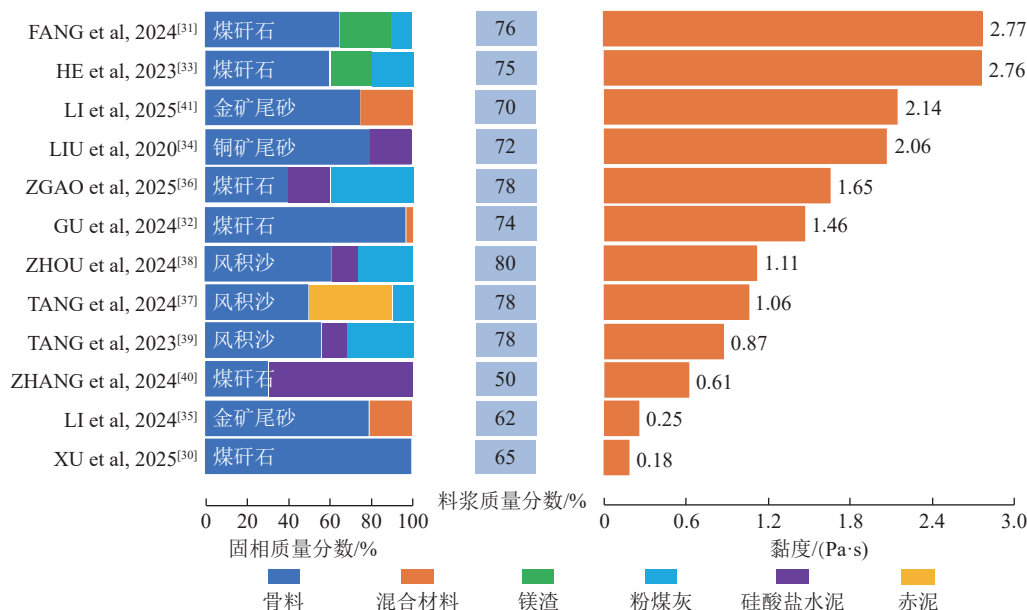


图 4 固废基充填材料管道输送的黏度分布

Fig.4 Viscosity distribution of solid waste-based cemented paste backfill slurry pipeline transportation

阻力计算公式主要有传统结构流阻力计算模型的白金汉流动方程,基于重力理论的杜兰德公式、北京有色冶金设计研究总院公式、金川似均质流公式及长沙矿冶研究院管输阻力计算公式等^[42-44],各公式的计算方程与侧重因素见表 2。白金汉流动方程主要考虑了充填料浆的黏度和屈服应力,适应于结构流充填料浆管输沿程阻力计算。杜兰德公式、金川似均质流公式、北京有色冶金设计研究总院公式、长沙矿冶研究院管输阻力计算公式为经验公式,通过充填料浆管道输送与清水的水力坡度试验确定管输阻力计算公式,主要考虑了充填料浆的密度、流动速度、管道直径等因素。其中,杜兰德公式的使用具有管径、粒径和流速的限制,金川似均质流公式细分为似均质料浆计算公式和非均质料浆计算公式。

2)管道输送阻力预测。固废充填料浆性质各异,传统管道输送阻力计算公式难以精确计算各类型固废基充填料浆管输阻力。因此,机器学习等人工智能方法引入固废基充填料浆管输阻力预测和料浆流变性能预测中。预测方法主要为机器学习模型。

机器学习模型中的单一模型,如 MUHAMMAD 等^[45]使用机器学习算法预测碱激发材料的屈服应力、塑性黏度性能,精确度可以达到 $R^2>0.90$ 。LI 等^[46]使用机器学习算法(支持向量机、高斯过程回归、随机森林、极限梯度提升)用于预测不同剪切速率条件下充填浆体的流变参数,其中极限梯度提升算法的预测效果最好,在测试集上可以达到 $R^2>0.9$ 的精度。并使用沙普利可加性特征解释方法模型阐释极限梯度提升模型在预测中料浆各特征对流变性能的影响

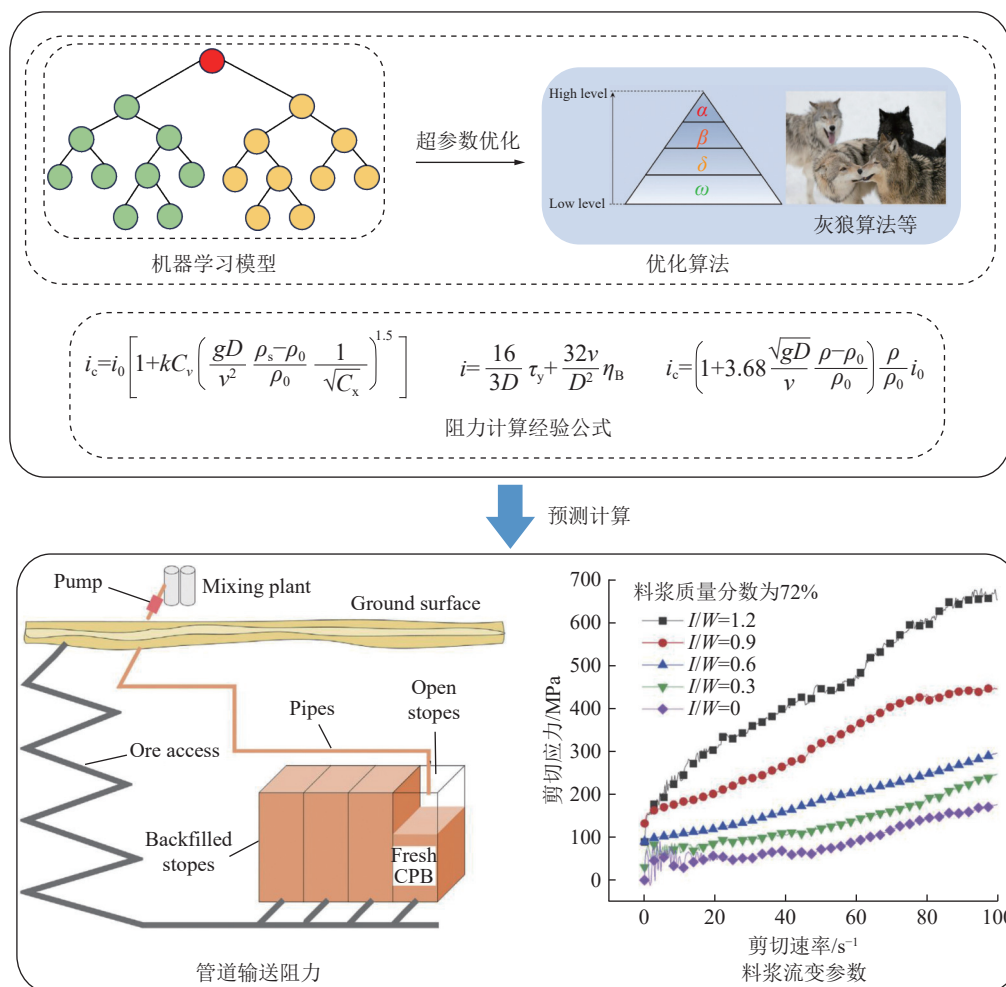
程度。QI 等^[47]考虑料浆质量分数、水泥含量、入口压力和管道回路形状因素,使用梯度提升回归树进行了管道输送阻力预测研究。

机器学习模型中的融合模型,如 DONG 等^[48]使用混合熵+粒子群优化算法+支持向量机算法进行充填料浆回填过程中的屈服应力、塑性黏度、流动性能的预测。MORADKHANI 等^[49]使用高斯回归过程、多层感知神经网络和径向基函数神经网络,进行混凝土的屈服应力、塑性黏度性能预测。

以上研究结果表明,通过经验公式和机器学习预测的方法均可以实现充填料浆管道输送阻力的计算和预测,但经验公式侧重于试验数据与工程经验的总结归纳,一般通过特定条件下的充填料浆管输阻力数据进行分析。机器学习预测侧重于大数据的收集和模型训练,通过对大量包含不同工况、环境、料浆性质等多维度信息的数据进行分析,让模型自动学习影响充填料浆管道输送阻力的关键因素及其相互作用方式,进而实现对输送阻力的精准预测。在管输阻力计算研究中,计算公式还需要进一步考虑非牛顿流体的触变性,机器学习预测方法还需要全面考虑影响管道输送阻力的因素,如温度、料浆触变性等。

2.4 管输性能优化手段

充填体质量是地下矿山控制地压的关键手段,因此对充填料浆输送浓度要求较高。但高浓度充填料浆必将大幅度提高管道输送的阻力。因此,优化充填料浆的管道输送性能是管道输送的研究热点。相关研究表明,管道输送过程中的压力损失影响因



注: i 为水力坡度, Pa/m; D 为管道直径, m; τ_y 为料浆屈服应力, Pa; η_B 为料浆塑性黏度, Pa·s; v 为料浆流速, m/s; i_c 为水平直管单位长度料浆水力坡度, kPa/m; i_0 为水平直管单位长度清水水力坡度, kPa/m; k 为常数, $k=80 \sim 150$; ρ_s 为固体物料密度, t/m³; ρ_0 为清水密度, t/m³; g 为重力加速度, 9.8 m/s²; C_v 为料浆体积分数, %; C_x 为固体颗粒沉降阻力系数, %; ρ 为充填料浆密度, t/m³。

图 5 管道输送沿程阻力计算方法^[34]

Fig.5 Calculation method for resistance along pipeline transportation^[34]

表 2 充填料浆管道输送阻力计算公式

Table 2 Calculation formula for pipeline transportation resistance of cemented paste backfill slurry

公式	计算式	参数说明	应用范围
白金汉流动方程	$i = \frac{16}{3D} \tau_y + \frac{32v}{D^2} \eta_B$	i 为水力坡度, Pa/m; D 为管道直径, m; τ_y 为料浆屈服应力, Pa; η_B 为料浆塑性黏度, Pa·s; v 为料浆流速, m/s	结构流充填料浆
杜兰德公式	$i_c = i_0 \left[1 + k C_v \left(\frac{gD \rho_s - \rho_0}{v^2} \frac{1}{\rho_0} \frac{1}{\sqrt{C_x}} \right)^{1.5} \right]$ $C_x = \frac{4 d_{cp} (\rho_s - \rho_0)}{3 \rho_0 v^2}$	i_c 为水平直管单位长度料浆水力坡度, kPa/m; i_0 为水平直管单位长度清水水力坡度, kPa/m; k 为常数, $k=80 \sim 150$; ρ_s 为固体物料密度, t/m ³ ; ρ_0 为清水密度, t/m ³ ; g 为重力加速度, 9.8 m/s ² ; D 为管径, m; v 为料浆流速, m/s; C_v 为料浆体积分数, %; C_x 为固体颗粒沉降阻力系数, %; d_{cp} 为颗粒平均粒径, cm	管径 19.1 ~ 584.4 mm、流速 0.61 ~ 6 m/s
北京有色冶金设计研究院公式	$i_c = i_0 \left(1 + \frac{C_w}{1 - C_w} \frac{1}{v^2} \right) \frac{\rho_g}{\rho_0}$	i_c 为水平直管单位长度料浆水力坡度, kPa/m; i_0 为水平直管单位长度清水水力坡度, kPa/m; ρ_g 为固体物料密度, t/m ³ ; ρ_0 为清水密度, t/m ³ ; v 为料浆流速, m/s; C_w 为料浆质量分数, %	
金川似均质流公式	$i_c = i_0 \left\{ 1 + 106.9 C_v^{4.42} \left[\frac{gD(\rho_s - 1)}{v^2 \sqrt{C_x}} \right]^{1.78} \right\}$ $i_c = i_0 \left\{ 1 + 108 C_v^{3.96} \left[\frac{gD(\rho_s - 1)}{v^2 \sqrt{C_x}} \right]^{1.12} \right\}$	i_c 为水平直管单位长度料浆水力坡度, kPa/m; i_0 为水平直管单位长度清水水力坡度, kPa/m; C_v 为料浆体积分数, % C_x 为固体颗粒沉降阻力系数, %; v 为料浆流速, m/s; D 为管道的直径, m; ρ_s 为固体物料密度, t/m ³	似均质料浆 非均质料浆
长沙矿冶研究院管输阻力计算公式	$i_c = \left\{ 1 + 3.68 \frac{\sqrt{gD}}{v} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \right\} \frac{\rho}{\rho_0} i_0$	i_c 为水平直管单位长度料浆水力坡度, kPa/m; i_0 为水平直管单位长度清水水力坡度, kPa/m; D 为管道直径, m; ρ 为充填料浆密度, t/m ³ ; ρ_0 为清水密度, t/m ³ ; v 为料浆流速, m/s	

素重要性为:直管段中,质量分数>流速>粒度分级;弯管段中,流速>质量分数>粒度分级;通过降低流速和质量分数可以有效降低煤浆管道输送的沿程阻力^[50](图 6)。

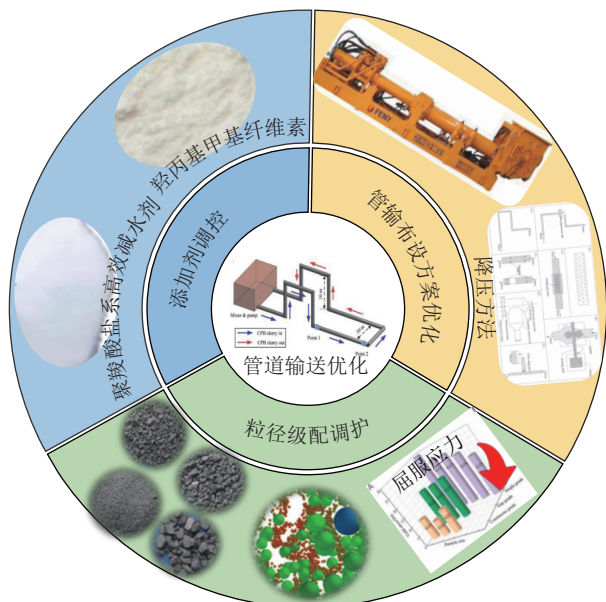


图 6 管道输送优化方法

Fig.6 Optimization methods for pipeline transportation

针对固废基充填料浆长距离输送,通常使用以下方法优化输送:

1)粒径级配调控:选矿尾砂分为全尾砂分级尾砂,一般可通过溢流或旋流分级器的方法调控尾砂粒径级配。研究表明:相同的工况条件下,颗粒的级配越宽,输送的耗能越小,管道内径增加、颗粒的形状系数较小,可以降低管道输送的阻力。在宽级配的浆料中,增加细颗粒可以起到管道输送减阻的作用^[51-52]。在煤矿充填中,增加煤矸石颗粒的级配的连续性,且在 40% 的粒径 $\leq 4.75\text{ mm}$ 时,料浆的孔隙率最小,此时输送阻力降低^[53]。当尾砂粒径 $< 38\text{ }\mu\text{m}$ 的累计比例为 27.43%~38.32% 时,滑移减阻率最佳^[54]。

2)添加剂调控:通过添加剂可以有效调控料浆的屈服应力和黏度等流变特性。目前,主要使用的添加剂有高效减水剂(包括木质素磺酸盐类减水剂,萘系高效减水剂,三聚氰胺系高效减水剂,氨基磺酸盐系高效减水剂,脂肪酸系高效减水剂,聚羧酸盐系高效减水剂)、增稠剂(羟丙基甲基纤维素)。其中,减水剂以聚羧酸盐系高效减水剂效果最佳^[55],可提高充填料浆的输送性能,产生的静电排斥和空间位阻可以分解超细颗粒形成的絮体结构,释放更多的自由水,降低颗粒间的摩擦,一般情况,最佳添加量为

0.15%~0.25%^[35]。当料浆骨料较粗时,如煤矸石,可添加增稠剂降低料浆输送过程中的离析程度,一定量的羟丙基甲基纤维素($< 0.1\%$)可以显著降低新鲜胶结尾砂的动态、静态屈服应力,但是会增加黏度^[56]。

3)管输方案优化:管输方案包括管道布设、管径分布、输送方式。为提高料浆的管道输送性能,可以通过调节充填倍线,控制料浆输送的性能。充填倍线较高时,可通过使用泵送的方式,提高料浆的输送性能。深井充填中,因充填倍线过低造成料浆剩余压力、速度过大造成管道破损,可通过设置减压池、增加水平管道长度、阻尼节流孔、变径管等方法实现料浆管道输送的调节^[57]。通过提高流速可有效防止因料浆离析导致的管道堵塞问题^[58],增加管道直径的方式会降低料浆的管道输送阻力。

3 固废基充填材料强度性能

尾砂是矿石经过选矿作业后,剩余的主要脉石矿物组成的细粒物质^[59],通常含有大量的 SiO_2 等惰性物质,在充填材料中作为骨料使用。为了保障充填体的力学性能与强度表现,国内外学者在开发固废基胶凝材料方面开展了深入研究。

3.1 强度分布区间

水泥作为传统充填的主要胶凝材料,具有生产成本低、能耗大、排碳多等缺点。因此,开发低碳经济的固废基胶凝材料是实现充填技术安全绿色协同发展的关键。当前,判断固废材料是否能作为合适的胶凝材料不仅需要考量与之搭配的骨料特性,更取决于固废材料自身所具备的 3 种特性:水化特性、火山灰特性和激发特性。因尾砂性质各异,其作为骨料时需要搭配不同的固废基胶凝材料组合策略,使得固废基充填材料的力学性能各不相同。

图 7 统计了采用不同尾砂制备的固废基充填材料的强度情况。从图中可以清晰看出,灰砂质量比是影响固废基胶结充填体强度的关键因素。当灰砂质量比大于 1:8 时,充填体强度均能达到 1.5 MPa,这一强度水平能够满足绝大多数矿山的充填需求。当采用同种尾砂作为骨料时,因为胶凝材料的组分不同,充填体的强度差异较大,主要因为不同胶凝材料组分的水化反应进程及水化产物生成量不同,造成微观结构不同导致的强度差异。在铁尾砂充填中,在相同灰砂质量比条件下使用矿渣作为单一的胶凝材料,可获得更高的强度。赤泥充填中,充填体强度较低,主要为赤泥碱性较大,在水化反应中易造成充

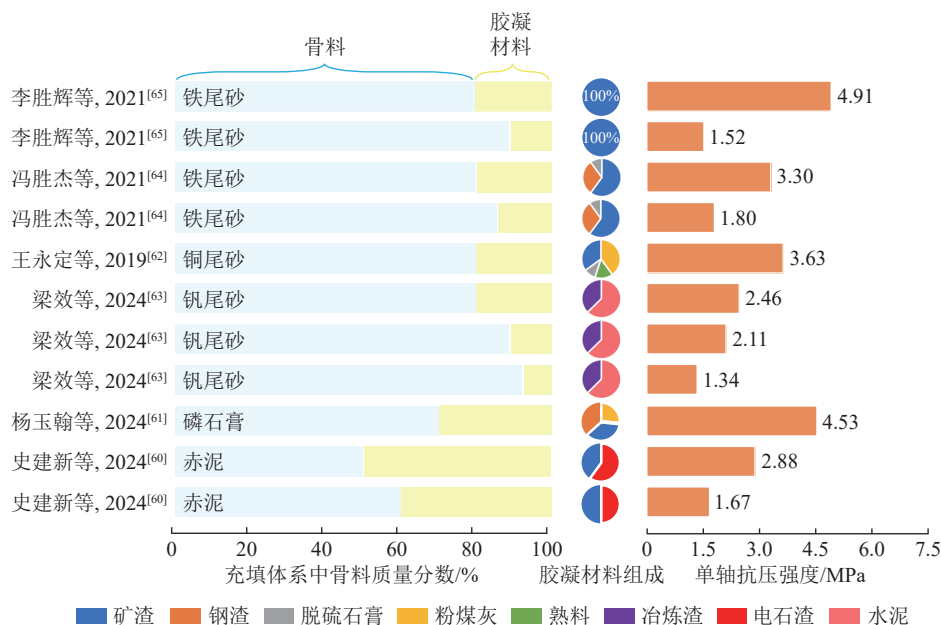


图 7 固废基充填材料的单轴抗压强度(28 d)

Fig.7 Uniaxial compressive strength (UCS) of solid waste-based backfill material (28 days)

填体的返碱导致微观结构的劣化, 导致充填体强度较低。增加电石渣的比例, 可有效提高充填体的强度, 主要因为电石渣的较强的碱性可为赤泥基充填体的初期水化反应提供碱激发效果^[66]。但是, 充填体碱性过强会造成后期强度劣化, 为保证充填体对采空区地压的有效管控, 需要综合评价充填体长期的强度发展。在磷石膏充填中, 使用碱激发方法可以大幅提高充填体的强度, 主要因为磷石膏属于酸性固废, 与胶凝材料混合后抑制水化反应的进程, 使用碱性材料中和磷石膏中的酸性有益于充填体的强度发展^[67]。固废材料的性质各异, 所需的胶凝材料性质要求各异, 因此针对特定的固废需提出针对性的固化方法, 为多源固废的高效处理提供依据。此外, 值得关注的是, 针对特定的固废材料, 若采用碱激发或盐激发手段, 充填体的强度会显著提升。另外, 随着现代科学技术的发展, 越来越多先进的表征手段如压汞法(MIP)、核磁共振法(NMR)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、X 射线衍射试验(XRD)、热重分析试验(TG)等被应用至充填体强度研究, 使得研究人员能够在孔隙特征、微观结构和水化程度等方面对固废基充填材料力学强度展开多维度的表征与讨论(图 8)。

3.2 强度优化手段

强度达标的充填体能够支撑采场顶板和两帮, 避免在岩体自重与地应力作用下垮塌, 创造安全开采条件。当前, 固废基充填材料的强度优化手段主要聚焦于优化充填体配比、采用添加剂与改进充填



图 8 多元微观表征技术

Fig.8 Multivariate microscopic characterization technology

工艺 3 方面(图 9)。

1) 优化充填体配比。充填配比(如水泥、骨料、外加剂的质量比)直接影响充填体的强度。其中, 胶凝材料是保障充填体强度的关键因素。在合理的范围内增加胶凝材料用量可以有效提高充填体强度。例如, 刘树龙等^[68]将金矿尾砂基充填体中水泥含量从 10% 增加到 30% 时, 充填体 7 d 抗压强度由 0.45 MPa 增长至 1.63 MPa。还可以考虑采用更高性能胶凝材料来提高固废基充填体强度。张大伟^[69]研究发现, 掺入硫铝酸盐水泥能显著提高胶结料的早



图 9 固废基充填体强度优化方法

Fig.9 Optimization method for solid waste-based cemented paste backfill body strength

期强度,强度最大为 7.4 MPa。同时,采用连续级配的骨料,可以减少空隙率,提升充填体强度。巴蕾等^[70]提出不同废石掺量的混合骨料粒径分布范围越大,越有利于保证充填体早期强度。此外,相关研究者在对骨料进行预处理领域进行了广泛探索。如对尾砂进行碱洗预处理,碱洗过程能够为固废材料营造碱性水化环境,这一环境对水化反应的进行具有显著的促进作用,不仅能够有效加快水化产物的生成,还能优化产物结构,从而显著提升充填体的强度。

2)采用早强剂和外加剂。固废基充填体成分多元、结构复杂,仅依靠胶凝材料,常常难以确保充填体强度达到标准要求。这种情况下,外加剂的使用就显得尤为关键。早强剂通过提高料浆反应体系的碱度、压缩双电子层、提供晶核降低成核势垒等作用,破坏水化阻滞提高液相中的离子浓度,加快水化产物,如钙矾石或钙铝水滑石等的生成,提高早期固相的强度和致密性^[71-72]。郑娟容等^[73]在将全尾砂胶结膏体掺入早强剂后,充填体 7 d 强度提高 63.8%, 28 d 强度提高 25.7%。减水剂主要通过包裹水泥颗粒表面形成稳定的溶剂化膜,降低水泥颗粒间的滑动阻力,改善料浆流变性能,实现高浓度料浆充填的目的,从而提高充填体的强度。在保持充填材料工作性能的前提下,通过添加减水剂减少充填体中的孔隙,提高其强度。周艳华等^[74]发现,在多元铬铁渣充填材料体系中,充填体抗压强度随着减水剂掺量的增加呈先上升后降低的趋势,并在 0.3% 时达到最大值。

3)改善充填工艺。在改善充填工艺提升充填体强度方面,既构建了丰富理论体系,也积累了大量实践成果。提高充填浓度是提升尾砂基充填体的重要手段。高浓度充填能够减少了充填体中的游离水,使胶凝材料能够更好地包裹骨料,加速水化反应,并且在凝固后形成更加致密的结构。为了实现高浓度

充填,可以采用高效浓密设备对充填浆料进行浓缩,如深锥浓密机能够将尾砂等充填材料的质量分数提高到 70% 以上^[75],提高充填体强度。也可以采用分层充填、振捣处理等方法来优化充填方式,能够有效规避充填体强度分布不均的问题,让充填体结构更加密实,性能更加稳定。

4 固废基充填材料环境影响

由于固废基充填材料往往是作为工业副产物的形式产生,由多种矿物构成的复杂体系,部分固废基充填材料中也会伴生有害物质。当固废基充填材料回填至采空区时,充填体由于自身泌水与地下水的浸泡侵蚀,短时间内充填体引发的环境污染较小,但随着时间推移至数年甚至数十年的尺度,充填材料中的有害物质会缓慢渗出,逐渐污染土壤和地下水,引发不可忽视的环境污染问题(图 10)。因此,针对固废基充填材料水污染风险与污染元素全周期浸出机制的研究尤为重要。

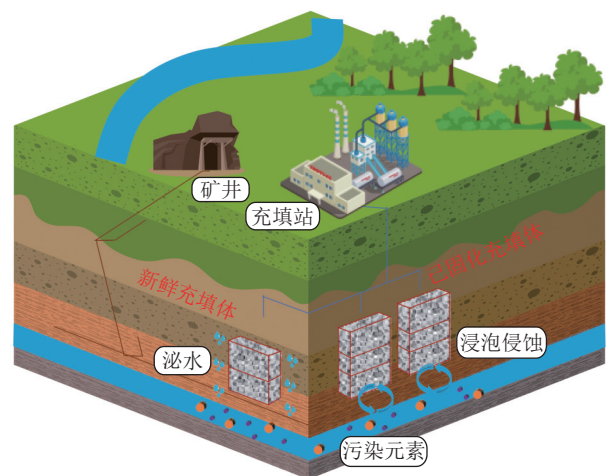


图 10 固废基充填材料对环境的影响

Fig.10 Impact of solid waste-based cemented paste backfill materials on environment

4.1 充填料浆早期污染风险

固废基充填料浆在采空区固化阶段的泌水污染,是矿山地下水环境污染的“第一道门槛”。以某矿山的全尾砂充填体为例,随着质量分数的变化,充填体泌水率在 3% ~ 25% 的范围波动^[76]。这意味着在充填体凝结硬化初期,大量的充填体泌水直接与地下水接触,并伴随着污染物的扩散。具体而言,煤矸石基充填体需要关注铁、铅、镉等重金属溶出^[77-78];磷石膏基充填体要注意其中磷酸盐、氟化物和硫酸盐扩散;赤泥基充填体则需要警惕其中铁、钛、铝等污染元素的浸出风险^[79]。针对不同固废材料充填所带来的地下水环境影响,应严格参照《地下水环境质量标准》管控污染元素的扩散风险,必要时需调整充填方案与配比参数设计。

4.2 充填体长期污染风险

充填体长期污染风险是指,采空区长期固化形成的充填体与地下水环境长期接触,因地下水渗透侵蚀而析出有害物质。为了开发出更低碳环保的绿色充填技术,相关学者针对有害元素在充填体中的固化过程开展了深入研究。研究表明,水合反应形成的胶结产物在有害物质的固化过程中起到至关重要的作用。得益于室内试验与数值模拟相互补充,当前对污染元素浸出机制的研究已从表观现象描述

向多尺度理论融合转变。

在室内试验方面,研究人员采用毒性浸出试验与微观表征相结合,深入探究水合产物对污染元素的固化作用。LIU 等^[80]通过 X 射线衍射试验结果与电子扫描图像两相印证,证实了高铝基材料促进了水合硅酸盐沉淀,增强了对铅离子与硫酸盐的高效固化效果。WANG 等^[81]利用 EMPA 成像技术证明了氧化钙促进了磷石膏基充填材料中钙矾石的形成,大幅提升了充填体的固氟能力。

数值模拟上主要使用 Gibbs Energy Minimization Selektor (GEMS) 与 pH Redox Equilibrium C++(PHREEQC)软件来建立地球化学模型,基于 CEMDATA18、PHREEQCDAT 数据库,结合微观表征结果,探究了不同水化产物对各有害组分的固化机理。

4.3 充填体污染元素浸出影响与固化机制

固废基充填体中污染元素浸出与固化是一个复杂的过程,往往需要结合矿物化学、地球物理学、热力学和物质运移理论才能对目标组分的自由扩散进行合理的评估(图 11)。充填体中污染元素浸出速率与充填体自身性质、浸出环境条件与外部环境影响密不可分^[82]。而在固化机制方面,则主要可以概括为吸附、替代、沉淀和封裹。

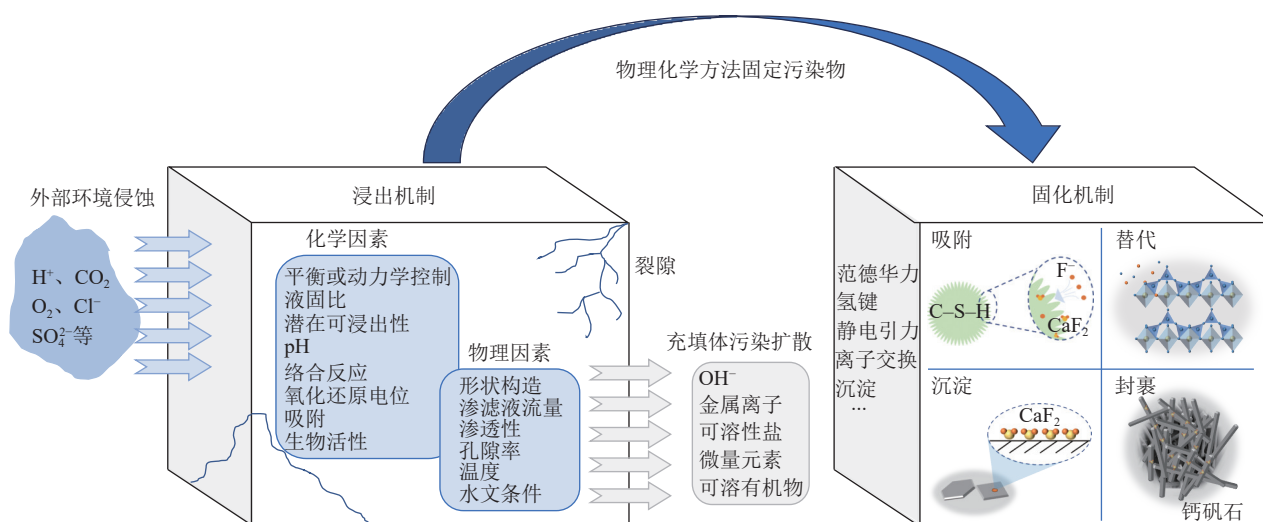


图 11 固废基充填体中污染元素浸出与固化机制

Fig.11 Leaching and solidification mechanism of pollutant elements in solid waste-based cemented paste backfill material

1) 充填体的物理与化学性质是决定污染物固化效果的主要因素。物理性质主要包括充填体的孔隙率、密实度,充填材料的比表面积、粒径分布,充填料浆的浓度等均影响充填体对污染物的固定效果。充填材料的粒径级配合理,则充填体的密实性显著提高、孔隙率显著降低,提高污染物的固定效果^[83]。化

学作用主要包括充填体的水化反应程度、充填体的酸碱度等。合理的充填体浓度、灰砂质量比和酸碱度,可显著提高充填体的水化反应进程,形成更加密实的层间结构,固定污染物。

2) 浸出环境条件。与充填体接触的水流动态模式分为 2 种:一种是在充填体周围流动,另外一种是在

从充填体内部的多孔结构中渗透,前者中污染元素的浸出受孔隙溶液扩散至固液接触界面的质量传输速率控制,后者则受基于渗流速率的质量传输控制或者溶解平衡控制^[84]。

3) 外部环境影响。在各类地下处置场景中,环境里的二氧化碳、有机物、金属以及盐类,可通过多种途径溶解于地下水中,进而影响充填体中组分的浸出。同时,在浸出和老化过程中,随着孔隙溶液组分不断溶出,受碳化、硫酸盐侵蚀等因素影响,充填材料的稳定性与孔隙结构会发生改变,这必然对组分的浸出速率和释放程度产生作用^[85-86]。

4) 污染元素固化机制。污染元素的固化主要为物理作用和化学作用,包括:吸附、替代、沉淀和封装^[87]。吸附作用主要包括物理吸附和化学吸附,物理吸附作用主要通过范德华力、静电引力和氢键的作用,将污染物吸附于吸附剂表面;化学吸附作用主要指吸附剂表面的活性位点与污染物离子之间形成共价键、离子键或配位键,将污染物离子固定于吸附剂结构中。替代作用是指在化学反应中,利用吸附剂原有的污染物离子替换自由的重金属离子,形成更加稳定的结构。沉淀作用主要指重金属离子(如 Pb^{2+}) 在碱性环境下易生成氢氧化物的沉淀($Pb(OH)_2$), 实现重金属离子的固定。封装作用主要指充填体中胶凝材料水化反应生成大量的水化硅酸钙、水化铝酸钙,通过其层间分布的 10 ~ 100 nm 的微孔隙固定污染物^[81]。通过以上污染物固定的方式,实现充填体和地下水中污染物的固定。

4.4 充填污染防控技术与治理现状

矿山充填污染治理是矿山绿色转型的核心议题,其目标在于实现固废资源化利用与生态环境保护的协同。当前聚焦污染物源头控制、迁移过程阻隔及长期稳定性保障研究,污染治理技术逐步从末端处理向全过程防控推进。

1) 污染源头控制与固废协同。矿山充填污染治理以固废资源化利用为核心,通过材料改性实现污染物源头控制。采用水泥、地质聚合物等胶凝材料固化污染物(如 Pb^{2+} 、P、F⁻),其水化产物 C-S-H 凝胶可通过离子交换将污染元素浸出浓度降低^[88]。针对酸性污染,添加钢渣、石灰等碱性材料调节充填体 pH 至 8 ~ 10,使污染元素浸出质量浓度控制在 1.0 mg/L 以下^[89]。放射性污染物(如铀尾砂)则通过掺入高炉矿渣、粉煤灰与生石灰进行固化,放射性物质析出率可达到 GB23727—2009《铀矿冶辐射防护和环境保护规定》的要求:氡析出率不超过 0.74 Bq/

($m^2 \cdot s$)^[90]。

2) 过程监控与迁移阻控技术。污染迁移过程的动态监测与预测是治理体系的关键环节。分布式光纤传感网络能够实时监测充填体温度、应变及渗流场变化^[91]。在此数据基础上构建充填体扩散的应力-化学-渗流-污染物浸出及迁移耦合数学模型。将构建的数学模型嵌入到 Groundwater Modeling System 软件中,能够实现对不同配比条件、不同外界环境以及不同阶段的污染物扩散风险预测^[92]。

3) 技术瓶颈与终端治理路径。尽管矿山污染治理技术取得了显著进展,但仍存在成本与效能矛盾,充填体长期稳定性存疑等问题。现阶段污染控制技术单位治理成本过高,在一定程度上制约规模化应用。同时,现有研究多基于短期试验,而充填体在 CO_2 碳化、硫酸盐侵蚀等复杂地质作用下,胶结相分解可能导致污染物二次释放^[93]。因此,充填体在长期服役过程中的稳定性还需要进一步验证。

5 结 语

1) 材料组分方面,固废基材料来源广泛,各材料性能复杂且差异较大。典型工业固废(尾砂、钢渣、粉煤灰等)的化学组分呈现显著互补性, SiO_2 (质量分数 18.57% ~ 55.30%)、 CaO (质量分数 1.10% ~ 36.77%) 和 Al_2O_3 (质量分数 4.22% ~ 28.81%) 的梯度分布为协同胶凝提供了物质基础。但盲目式粗放混合无法充分发挥固废潜力,多源固废的协同调控机制仍需进一步深入研究。

2) 充填管输与强度性能方面,固废基充填料浆屈服应力分布在 60 ~ 200 Pa,基于粒径级配优化与聚羧酸减水剂的复合调控技术,可使管道输送阻力大幅降低。固废基充填材料性质各异,选用恰当的激发剂和辅助胶凝材料配比可有效提高充填体强度,如在磷石膏、矿渣中采用碱激发可有效提高充填体强度,根据各类辅助胶凝材料特性可选用合理比例配制高效,如使用钢渣、矿渣制备胶凝材料提高磷石膏充填体强度。虽然固废基充填已得到大范围推广,但输送性能和强度性能彼此孤立,缺乏性能数据关联。管输性能和强度性能的协同调控亟待深入研究。

3) 环境风险防控方面,固废基充填材料回填至采空区时,由于泌水与地下水的长期浸泡侵蚀,其中有害物质扩散至周边环境,引发不可忽视的环境污染问题。目前污染监测技术尚不成熟,因此,研究重金属的浸出和固定机理是保障地下水环境安全的

重要防线。由于地下水的复杂性及采矿活动扰动,固废基充填体内污染物的高效固定也是未来需进一步研究的关键技术难题。

参考文献(References):

- [1] WANG Y M, CHEN Q S, DAI B B, et al. Guidance and review: Advancing mining technology for enhanced production and supply of strategic minerals in China[J]. *Green and Smart Mining Engineering*, 2024, 1(1): 2-11.
- [2] MARIN Oscar A, KRASLAWSKI Andrzej, CISTERNAS Luis A. Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 184: 107629.
- [3] CHEN Q S, ZHANG Q, WANG Y M, et al. Highly-efficient fluoride retention in on-site solidification/stabilization of phosphogypsum: Cemented paste backfill synergizes with poly-aluminum chloride activation[J]. *Chemosphere*, 2022, 309: 136652.
- [4] 陈秋松, 吴爱祥. 磷石膏充填技术研究进展[J]. *工程科学学报*, 2025, 47(2): 195-214.
CHEN Qiusong, WU Aixiang. Research progress of phosphogypsum-based backfill technology[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(2): 195-214.
- [5] JIN J X, LI M X, LIU T, et al. Insights into factors influencing coal gangue-filled backfill cemented by self-consolidating alkali-activated slag grouts[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134422.
- [6] JIANG H Q, QI Z J, YILMAZ E, et al. Effectiveness of alkali-activated slag as alternative binder on workability and early age compressive strength of cemented paste backfills[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 218: 689-700.
- [7] JIN J X, CHEN Y Y, LI M X, et al. Preparation of self-consolidating cemented backfill with tailings and alkali activated slurry: Performance evaluation and environmental impact[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 438: 137088.
- [8] LI X B, DU J, GAO L, et al. Immobilization of phosphogypsum for cemented paste backfill and its environmental effect[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 137-146.
- [9] SARI M, YILMAZ E, KASAP T. Long-term ageing characteristics of cemented paste backfill: Usability of sand as a partial substitute of hazardous tailings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 401: 136723.
- [10] 刘昕, 王仲亮, 包燕平. 转炉钢渣资源化利用研究现状与应用展望[J]. *工程科学学报*, 2025, 47(4): 668-681.
LIU Xin, WANG Zhongliang, BAO Yanping. Resourceful utilization of converter steel slag: Research status and application prospects[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(4): 668-681.
- [11] 张刘阳, 陈潇, 吕国明, 等. 钢渣特性随粒级分布的规律研究[J]. *材料导报*, 2025, 39(3): 133-140.
ZHANG Liuyang, CHEN Xiao, LYU Guoming, et al. Study on the law of steel slag characteristics with particle size distribution[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(3): 133-140.
- [12] WEI H J, WAN H F, YUAN S, et al. A new gelling material: Properties of recycled aggregate concrete under conditions of complete cement replacement using steel slag, ore slag, and fly ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 464: 140180.
- [13] YANG D T, WANG P, CHEN W L, et al. Effects of red mud, desert sand, and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and microstructure of fly ash-based geopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 468: 140471.
- [14] HE Y, CHEN Q S, KANG Q, et al. Effect of enhanced pozzolanic activity in nickel slag modified with Al_2O_3 on mechanical properties of cemented fine tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134610.
- [15] 王雪, 王恒, 王强. 我国锂渣资源化利用研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(24): 63-73.
WANG Xue, WANG Heng, WANG Qiang. Research progress on resource utilization of lithium slag in China[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(24): 63-73.
- [16] YUAN L Q, LIU L P, SUN L J, et al. Feasibility study of lithium slag as cementitious material with high-content application in cement stabilized macadam bases[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 457: 139224.
- [17] 时雅倩, 关渝珊, 葛伟哲, 等. 粉煤灰建材化增值利用: 最新技术与未来展望[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(6): 2860-2875.
SHI Yaqian, GUAN Yushan, GE Weizhe, et al. Value-added utilization of pulverized fuel ash as construction materials: State-of-the-art technologies and future prospects[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(6): 2860-2875.
- [18] ZHANG W, JIANG S Q, LI X, et al. Multi-objective optimization of concrete pumping S-pipe based on DEM and NSGA-II algorithm[J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119314.
- [19] XU X C, ZHAO Y Q, GU X W. Utilization of chromium-rich decarbonized coal gasification slag as mineral admixture in cemented mortar: Mechanical performance, hydration property and chromium immobilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 470: 140614.
- [20] FENG Y, YANG Q X, CHEN Q S, et al. Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 1112-1120.
- [21] CHEN Q S, TAO Y B, FENG Y, et al. Utilization of modified copper slag activated by Na_2SO_4 and CaO for unclassified lead/zinc mine tailings based cemented paste backfill[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 290: 112608.
- [22] 许荣盛, 汪浩然, 杨仁和, 等. 减缩剂对碱激发矿渣-铜渣砂浆的影响及作用机理[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(11): 1047-1053.
XU Rongsheng, WANG Haoran, YANG Renhe, et al. Effect and mechanism of shrinkage reducing admixture on alkali-activated slag-copper slag mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(11): 1047-1053.
- [23] 胡其志, 李俊杰, 陶高梁, 等. 高炉矿渣-电石渣复合改良膨胀土工程特性与机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(2): 602-612.
HU Qizhi, LI Junjie, TAO Gaoliang, et al. Engineering property

- and mechanism of ground granulated blast slag-carbide slag composite improved expansive soil[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 44(2): 602–612.
- [24] 温震江, 高谦, 杨志强, 等. 金川镍渣充填胶凝材料力学性能与水化机理[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(4): 1074–1083.
- WEN Zhenjiang, GAO Qian, YANG Zhiqiang, et al. Mechanical properties and hydration mechanism of Jinchuan nickel slag filling cementitious material[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(4): 1074–1083.
- [25] 高海洋, 梁龙, 靳开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 192–208.
- GAO Haiyang, LIANG Long, JIN Kaiyu, et al. Review on resource utilization of coal gasification slag[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 192–208.
- [26] LIU B, ZHANG Q L, FENG Y, et al. Mechanical and microstructural analysis of cemented tailings backfill by copper slag through alkaline activation emphasizing red mud[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 428: 136341.
- [27] HE Y P, LV W Y, FANG Z Y, et al. The basic characteristics of paste backfill materials based on highly active mineral admixtures: Part I. Preliminary study on flow, mechanics, hydration and microscopic properties[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 187: 1366–1377.
- [28] 候春华, 杨志强, 高谦, 等. 金川全尾砂棒磨砂新型充填胶凝材料试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(3): 78–84.
- HOU Chunhua, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Experimental research on a new filling material compound of whole tailings and rod milling sand in Jinchuan Mine[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2015, 34(3): 78–84.
- [29] WANG J, FU J X, SONG W D, et al. Effect of rice husk ash (RHA) dosage on pore structural and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 840–851.
- [30] XU J F, ZHOU N, ZHANG J X, et al. Study on rheological properties of large particle gangue slurry and its drag reduction effect caused by wall slippage in pipeline transportation[J]. *Powder Technology*, 2025, 452: 120573.
- [31] FANG Z Y, GAO Y H, HE W, et al. Carbonation curing of magnesium-coal slag solid waste backfill material: Study on properties of flow, mechanics and carbon sequestration[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e03204.
- [32] GU C J, YANG B G, YANG F G, et al. Fluidity and rheological properties with time-dependence of cemented fine-grained coal gangue backfill containing HPMC using response surface method[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138691.
- [33] HE W, LIU L, FANG Z Y, et al. Effect of polypropylene fiber on properties of modified magnesium-coal-based solid waste backfill materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 362: 129695.
- [34] LIU L, FANG Z Y, WANG M, et al. Experimental and numerical study on rheological properties of ice-containing cement paste backfill slurry[J]. *Powder Technology*, 2020, 370: 206–214.
- [35] LI Q L, WANG B W, WEI Z, et al. Experiment and numerical simulation study of polycarboxylate superplasticizer modified cemented ultrafine tailings filling slurry: Rheology, fluidity, and flow properties in pipeline[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 438: 137041.
- [36] ZHAO B C, WEN J, ZHAI D, et al. Effect of calcium chloride on the properties of gangue cemented paste backfill: Experimental results of setting time, rheological properties, mechanical strength and microscopic properties[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22: e04331.
- [37] TANG R L, ZHAO B C, XIN J, et al. Multisolid waste collaborative production of aeolian sand-red mud-fly ash cemented paste backfill[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02843.
- [38] ZHOU J, LIU L, ZHAO Y, et al. Mechanism of air-entraining agent to improve the properties of coal-based solid waste backfill[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 2140–2148.
- [39] TANG R L, ZHAO B C, LI C, et al. Experimental study on the effect of fly ash with ammonium salt content on the properties of cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369: 130513.
- [40] ZHANG K, ZHOU M, LIAO Y, et al. Exploring the effect of self-combustion gangue powder particle distribution on rheological behavior and hydration mechanism in cement-based systems[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 447: 138124.
- [41] LI Q L, WANG B W, LIU C Y, et al. Rheological and thixotropic properties of cemented ultrafine tailings backfill with cold-bonded lightweight aggregates[J]. *Powder Technology*, 2025, 455: 120750.
- [42] 潘健. 两相流管道阻力公式的验证: 兼评张国权公式[J]. *煤炭学报*, 1981, 6(2): 48–54.
- PAN Jian. Verification of formulae for pressure drop for solid-liquid mixtures a brief comment on Zhang guoquan's formula[J]. *Journl of China Coal Society*, 1981, 6(2): 48–54.
- [43] 刘同有, 王佩勋. 金川集团公司充填采矿技术与应用[J]. *矿业研究与开发*, 2004, 24(S1): 8–14.
- LIU Tongyou, WANG Peixun. Jinchuan Group's Backfilling Mining Technology and Application[J]. *Mining Research and Development*, 2004, 24(S1): 8–14.
- [44] 方宗翰, 尹慰农, 唐锦涛, 等. 固液两相流水力坡度的计算[J]. *有色金属(矿山部分)*, 1982, 34(5): 5–8, 22.
- FANG Zonghan, YIN Weinong, TANG Jintao, et al. Calculation of hydraulic gradient of solid-liquid two-phase flow[J]. *Nonferrous Metals (Mining)*, 1982, 34(5): 5–8, 22.
- [45] ASHRAF M, NAZAR S, IQBAL M, et al. Exploring the rheological and mechanical properties of alkali activated mortar incorporating waste foundry sand: A comprehensive experimental and machine learning investigation[J]. *Results in Engineering*, 2024, 24: 102973.
- [46] LI H W, LIU J Z, YU C, et al. Quantify the effects of applied shear rate on measured rheological parameters of concrete based

- on machine learning[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 99: 111532.
- [47] QI C C, CHEN Q S, FOURIE A, et al. Pressure drop in pipe flow of cemented paste backfill: Experimental and modeling study[J]. *Powder Technology*, 2018, 333: 9–18.
- [48] DONG C W, XU J F, ZHOU N, et al. Adaptive drive-based integration technique for predicting rheological and mechanical properties of fresh gangue backfill slurry[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22: e04346.
- [49] MORADKHANI M A, HOSSEINI S H, AHMADI M M. Predictive analytics for fresh concrete rheological characteristics using artificial intelligence approaches[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110434.
- [50] XU J F, YAO Y N, YAN H, et al. Experimental study of pipeline pressure loss laws with large-size gangue slurry during the process of industrial-grade annular pipe transportation[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 436: 136993.
- [51] LI M Z, HE Y P, JIANG R H, et al. Analysis of minimum specific energy consumption and optimal transport concentration of slurry pipeline transport systems[J]. *Particuology*, 2022, 66: 38–47.
- [52] LI T S, HE L Y, SHEN J H, et al. CFD-DEM modelling of the conveying characteristics of a vertical pipeline for deep-sea mineral particles with wide particle size gradations[J]. *Powder Technology*, 2025, 453: 120654.
- [53] LI H, WANG H J, BAI L J. Effect of coal gangue grading characteristics on cemented paste backfill rheology[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03694.
- [54] WANG H J, ZHANG X, WU A X. Effect of particle size distribution of tailings on pressure gradient and drag reduction characteristics of non-cemented paste considering wall slip[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02792.
- [55] MANGANE M B C, ARGANE R, TRAUCHESSEC R, et al. Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 116: 3–14.
- [56] ZHANG Q S, QIU J P, JIANG H Q, et al. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose on coarse tailings cemented backfill: Rheology, stability, strength and microstructure[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 425: 136042.
- [57] DENG L W, LU H N, YANG J M, et al. Particle migration and slurry hydraulic resistance in multi-stage reducer pipes[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118352.
- [58] FENG G R, WANG Z H, QI T Y, et al. Effect of velocity on flow properties and electrical resistivity of cemented coal gangue-fly ash backfill (CGFB) slurry in the pipeline[J]. *Powder Technology*, 2022, 396: 191–209.
- [59] 王新民, 肖卫国, 张钦礼. 深井矿山充填理论与技术 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [60] 史建新, 孙星海, 周林邦, 等. 赤泥基全固废矿井充填材料的制备与性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(10): 946–954.
- SHI Jianxin, SUN Xinghai, ZHOU Linbang, et al. Fabrication and performance of mine filling materials derived from red mud based full solid wastes[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(10): 946–954.
- [61] 杨玉翰, 郭忠虎, 冯政, 等. 磷石膏协同多元固废制备矿山充填材料[J]. *金属矿山*, 2024(6): 235–241.
- YANG Yuhuan, WU Zhonghu, FENG Zheng, et al. Preparation of mine backfill material from phosphogypsum synergistic multifunctional solid waste[J]. *Metal Mine*, 2024(6): 235–241.
- [62] 王永定, 温震江, 杨晓炳, 等. 粉煤灰-矿渣基固结粉胶凝材料开发与配比优化研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(5): 88–94.
- WANG Yongding, WEN Zhenjiang, YANG Xiaobing, et al. Study on development and ratio optimization of cementing material of fly ash-slag based consolidated powder[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(5): 88–94.
- [63] 梁效, 王勇海, 牛芳银, 等. 用高硅型钒尾矿制备充填胶凝材料及增强其化学活性的机理分析 [J/OL]. *矿产综合利用*, 2024: 1–10[2024–12–25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=KCZL20241224002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- LIANG Xiao, WANG Yonghai, NIU Fangyin, et al. Preparation of filling cementing materials from high silicon vanadium tailings and mechanism analysis of its enhanced chemical activity[J/OL]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024: 1–10. [2024–12–25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=KCZL20241224002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [64] 冯圣杰, 李胜辉, 韩汉, 等. 钢渣基固结粉充填胶凝材料开发与应用研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(5): 44–48.
- FENG Shengjie, LI Shenghui, HAN Han, et al. Research on development and application of steel slag-based consolidation powder filling cementitious material[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(5): 44–48.
- [65] 李胜辉, 郭斌, 温震江, 等. 矿渣基胶凝材料开发和充填体强度与流变特性研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(10): 40–43.
- LI Shenghui, GUO Bin, WEN Zhenjiang, et al. Development of slag-based cementitious materials and study on strength and rheological properties of backfill[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(10): 40–43.
- [66] CEN X Q, ZHANG Y Q, ZHANG H E. Investigation on the mechanical and microstructure properties of masonry cement-red mud-carbide slag-based paste[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03979.
- [67] CHEN Q S, SUN S Y, WANG Y M, et al. In-situ remediation of phosphogypsum in a cement-free pathway: Utilization of ground granulated blast furnace slag and NaOH pretreatment[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137412.
- [68] 刘树龙, 王发刚, 李公成, 等. 基于响应面法的复合充填料浆配比优化及微观结构影响机制[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(8): 2724–2736.
- LIU Shulong, WANG Fagang, LI Gongcheng, et al. Optimization of mixture ratio and microstructure influence mechanism of composite filling slurry based on response surface method[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(8): 2724–2736.
- [69] 张大伟. 新型充填胶结料的胶凝性能研究[J]. *中国水泥*, 2017(12): 86–89.

- ZHANG Dawei. Study on cementing properties of new filling cementitious material[J]. *China Cement*, 2017(12): 86–89.
- [70] 巴蕾, 周尧, 卓庆奉, 等. 混合骨料粒径级配对充填体早期强度的影响[J]. *现代矿业*, 2023, 39(11): 196–199, 203.
- BA Lei, ZHOU Yao, ZHUO Qingfeng, et al. Influence of mixed aggregate particle size gradation on early strength of backfill[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(11): 196–199, 203.
- [71] 庞超明, 唐志远, 杨志远, 等. 水泥基材料中的早强剂及其作用机理综述[J]. *材料导报*, 2023, 37(9): 80–90.
- PANG Chaoming, TANG Zhiyuan, YANG Zhiyuan, et al. Early strengthening agent in cementitious composites and its function mechanism: A review[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(9): 80–90.
- [72] 施现院, 于光耀, 毕智强, 等. 早强剂对充填膏体宏观力学性能和微观结构的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(3): 135–139.
- SHI Xianyuan, YU Guangyao, BI Zhiqiang, et al. The effect of early strength agent on the macro mechanical properties and microstructure of filling paste[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(3): 135–139.
- [73] 郑娟荣, 赵雪飞, 谷迪. 早强剂对尾砂胶结膏体充填材料早期强度的影响[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2016, 68(1): 77–80.
- ZHENG Juanrong, ZHAO Xuefei, GU Di. Influence of accelerators on early-stage strengths of the tailings cemented paste backfill[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2016, 68(1): 77–80.
- [74] 周艳华, 张伟伟. 水泥协同多固废固化铬铁渣充填材料的制备及性能研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(10): 27–33.
- ZHOU Yanhua, ZHANG Weiwei. Study on preparation and properties of cement synergistic multi-solid waste solidified ferrochrome slag filling material[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(10): 27–33.
- [75] 陈鑫政, 郭利杰, 史采星, 等. 深锥浓密膏体充填工艺在国内某铜矿的应用与改进[J]. *中国矿业*, 2022, 31(5): 135–141.
- CHEN Xinzhen, GUO Lijie, SHI Caixing, et al. Application and improvement of paste filling process with deep cone thickener in a domestic copper mine[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(5): 135–141.
- [76] 谢经鹏, 杨柳华, 郑攻关, 等. 充填料浆泌水特性及其微观结构演变[J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(4): 1–7.
- XIE Jingpeng, YANG Lihua, ZHENG Gongguan, et al. Bleeding characteristics and the evolution of microstructure of tailings backfill slurry[J]. *Sustainable Mining and Metallurgy*, 2024, 40(4): 1–7.
- [77] 普曦峰. 生活垃圾焚烧炉渣资源化利用技术发展现状研究[J]. *低碳世界*, 2020, 10(3): 16–17.
- PU Xifeng. Research on the development status of domestic waste incineration slag resource utilization technology[J]. *Low Carbon World*, 2020, 10(3): 16–17.
- [78] 邓寅生, 欧睿, 李向峰, 等. 煤矸石井下填充后降解残渣对地下水的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2009, 29(6): 85–87.
- DENG Yinsheng, OU Rui, LI Xiangfeng, et al. Study on effect of residue produced by microbial degradation of coal Gangu filled into underground mine on groundwater[J]. *Mining Research and Development*, 2009, 29(6): 85–87.
- [79] 袁森森. 赤泥基胶凝材料设计制备及重金属离子固化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- YUAN Sensen. Design of red mud-based cementitious material and heavy metal ions sodification research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [80] LIU Y K, MOLINARI S, DALCONI M C, et al. Mechanistic insights into Pb and sulfates retention in ordinary Portland cement and aluminous cement: Assessing the contributions from binders and solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 458: 131849.
- [81] WANG D L, NA Q, LIU Y K, et al. Hydration process and fluoride solidification mechanism of multi-source solid waste-based phosphogypsum cemented paste backfill under CaO modification[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 154: 105804.
- [82] 高巍. 冶金渣基胶结剂固化含砷尾矿制备矿山充填料及其浸出特性[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- GAO Wei. immobilization of arsenic-containing tailings with metallurgical slag-based binders for the preparation of mine backfill material and its leaching characteristics[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024.
- [83] CHEN Q S, TAO Y B, ZHANG Q L, et al. The rheological, mechanical and heavy metal leaching properties of cemented paste backfill under the influence of anionic polyacrylamide[J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131630.
- [84] LIU Y K, DALCONI M C, BELLOTTO M P, et al. Pb-induced retardation of early hydration of Portland cement: Insights from in situ XRD and implications for substitution with industrial by-products[J]. *Cement and Concrete Research*, 2025, 193: 107867.
- [85] WANG L, YANG H Q, DONG Y, et al. Environmental evaluation, hydration, pore structure, volume deformation and abrasion resistance of low heat Portland (LHP) cement-based materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 540–558.
- [86] TREMIÑO R M, REAL-HERRAIZ T, LETELIER V, et al. Four-years influence of waste brick powder addition in the pore structure and several durability-related parameters of cement-based mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124839.
- [87] WANG D L, ZHANG Q L, LIU B, et al. Enhanced immobilization of fluoride in phosphogypsum-based cement-free paste backfill modified by polyaluminum chloride and its mechanism[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 458: 139622.
- [88] LIU Y K, CHEN Q S, WANG Y M, et al. In situ remediation of phosphogypsum with water-washing pre-treatment using cemented paste backfill: Rheology behavior and damage evolution[J]. *Materials*, 2021, 14(22): 6993.
- [89] ZHANG B, LI K Q, CHEN D P, et al. Exploration of the use of superfine tailings and ternary solid waste-based binder to prepare environmentally friendly backfilling materials: Hydration mechanisms and machine learning modeling[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(2): 115662.
- [90] 蒋复量, 王小丽, 黎明, 等. 不同掺合料及掺量下轴尾矿水泥固

- 化体力学性能及氡析出率测量实验研究[J]. 金属矿山, 2019(4): 41-47.
- JIANG Fuliang, WANG Xiaoli, LI Ming, et al. Experimental study on mechanical properties and radon exhalation rate of uranium tailings cement solidified body with different additive and dosage[J]. Metal Mine, 2019(4): 41-47.
- [91] 贾思学, 王雷. 光纤传感技术在矿山安全监测中的应用探究[J]. 中国设备工程, 2024(11): 173-175.
- JIA Sixue, WANG Lei. Application of optical fiber sensing technology in mine safety monitoring[J]. China Plant Engineering, 2024(11): 173-175.
- [92] 刘畅. 多场耦合下尾砂固结排放对重金属迁移的阻滞效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- LIU Chang. Study on solidified effect of heavy metal in consolidated and cemented tailings emission disposal with multifield coupling[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2018.
- [93] LIU Y K, WANG Y M, CHEN Q S. Using cemented paste back-fill to tackle the phosphogypsum stockpile in China: A down-to-earth technology with new vitalities in pollutant retention and CO₂ abatement[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(7): 1480-1499.