金属矿全尾砂膏体充填技术与装备研究进展及发展趋势*

段胜胜[1,2],尹旭岩[1,3,4],张祥[5],陈志清[6],郑伯坤[1,3,4],彭亮[1,3,4]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心, 湖南 长沙 410012;
3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
4.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
5.贵州西能磷业有限公司, 贵州 毕节市 552100;
6.广西华锡有色金属股份有限公司, 广西 南宁 530021)

摘要:全尾砂膏体充填技术作为金属矿绿色开采的核心技术,在矿产资源开发与生态环境保护协同发展中发挥着不可替代的作用。系统梳理了国内外全尾砂膏体充填技术领域的研究文献,从技术发展历程、膏体浓密与制备、管道输送及工程应用案例等多维度进行归纳总结。研究表明:国内外充填技术研究经历了干式充填、水砂充填、胶结充填、膏体充填四个阶段的演进。当前,膏体充填技术正朝着"高浓度、大流量、智能化、绿色化"方向快速发展,系统论述了膏体充填成套技术体系的核心成果,包括尾砂浆低能耗絮凝协同高浓度稳定放砂技术、多组分物料膏体高质量制备协同可靠输送技术、超深井膏体调压输送与充填安全管控技术,以及膏体仓储式浓密机、高速柔性搅拌机及锥阀式充填工业泵等充填关键装备的自主研发进展。通过柿竹园多金属矿等工程案例,展示了技术装备在不同矿山的成功应用成效,并结合现阶段的技术研究与未来发展趋势,对膏体充填技术向深地化、绿色化方向发展的路径进行了展望,旨在为我国矿业绿色低碳转型提供技术参考与决策支撑。

关键词:金属矿山;膏体充填;充填工艺与装备;绿色矿山

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0064-16

Research Progress and Development Trends of Unclassified Tailings Paste Backfill Technology and Equipment in Metal Mines

Duan Shengsheng[1,2], *Yin Xuyan*[1,3,4], *Zhang Xiang*[5], *Chen Zhiqing*[6], *Zheng Bokun*[1,3,4], *Peng Liang*[1,3,4]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China;
5.Guizhou Xineng Phosphorus Industry Co., Ltd., Bijie, Guizhou 552100, China;
6.Guangxi Huaxi Nonferrous Metals Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530021, China)

Abstract: As the core technology of green mining in metal mines, unclassified tailings paste backfill technology plays an irreplaceable role in the coordinated development of mineral resource exploitation and ecological environment protection. A systematic review of research literature on unclassified tailings paste backfill technology at home and abroad was conducted, and the research progress was summarized from multiple dimensions such as technological development history, paste thickening and preparation, pipeline transportation, and engineering application cases. Research shows that the research on backfill technology at home and abroad has gone through four evolutionary stages: dry backfill, hydraulic backfill, cemented backfill, and paste backfill. Currently, paste backfill technology is developing rapidly in the direction of "high concentration, large flow rate, intelligentization, and green development". The core achievements of the complete technology system for paste backfill were systematically discussed, including the low-energy flocculation of tailings slurry synergistic with high-concentration stable sand discharge technology, the high-quality preparation of multi-component material paste synergistic with reliable transportation technology, the pressure-regulated paste transportation and backfill safety control technology in ultra-deep

* **收稿日期**:2026-03-12
基金项目:国家科技重大专项项目(2026ZD1208602)
作者简介:段胜胜(2001—),男,湖南邵阳人,硕士,工程师,主要从事矿山充填工艺技术研究。E-mail:2956920518@qq.com

shafts, as well as the independent research and development progress of key backfill equipment such as paste storage thickeners, high-speed flexible mixers, and cone-valve industrial backfill pumps. Through engineering cases such as the Shizhuyuan polymetallic mine, the successful application effects of the technology and equipment in different mines were demonstrated. Combined with current technological research and future development trends, the development path of paste backfill technology towards deep underground and green development was prospected, aiming to provide technical reference and decision-making support for the green and low-carbon transition of the mining industry in China.

Key words: Metal mine, Paste backfill, Backfill process and equipment, Green mine

0 引言

矿产资源是国民经济和社会发展的重要物质基础。随着我国矿产资源的持续开发，选矿尾砂的产出量逐年递增，地表尾矿库的库容日趋紧张[1]。据统计，我国现有尾矿库数量逾万座，其中部分尾矿库已接近或达到设计库容上限。与此同时，尾矿库溃坝、渗漏等安全事故时有发生，对社会安全和生态环境构成严重威胁。此外，尾砂地表堆存占用大量土地资源，粉尘污染和地下水污染问题日益引发社会关注。在此背景下，国家有关部门相继出台了《关于加快建设绿色矿山的实施意见》《“十四五”大宗固体废弃物综合利用指导意见》《防范化解尾矿库安全风险工作方案》等政策文件，明确提出“尾矿库数量原则上只减不增”的要求。现实中，传统的尾矿库堆存模式已难以满足绿色矿山建设可持续发展的要求，亟须寻求能够从源头消纳尾砂的替代技术方案[2]。

充填采矿法是解决尾砂处置难题与实现矿山绿色开采的有效技术途径[3]。充填技术将选矿产生的尾砂等固体废弃物与胶凝材料和水按一定配比混合，制备成具有良好流动性的充填料浆，通过管道自流或泵送方式输送至井下采空区进行回填，充填料浆在采空区中固化后形成具有一定强度的充填体[4]。充填采矿法通常以尾砂为主要充填骨料，将原本需要地表堆存的固体废弃物回填至井下采空区，实现尾砂的资源化利用，从源头上减轻尾矿库的库容压力和溃坝风险。充填体在井下固化后可有效支撑围岩、控制地压，为相邻采场的安全回采创造作业条件[5]。充填技术经历了漫长的发展过程，从最初利用废石干式充填的原始方式，到水砂充填实现管道化输送，再到胶结充填形成具有自立性强度的充填体，直至当代全尾砂膏体充填技术的成熟应用，每一次技术的跃迁都推动了采矿工艺的深刻变革[6-9]。

本文立足膏体充填技术发展脉络，系统梳理国内外代表性文献，对全尾砂膏体充填技术的研究进展进行综述。重点剖析国内外相关研究的技术特征与差异，归纳膏体充填成套技术体系的核心创新成果，并对现有研究存在的不足进行分析展望。

1 国内外充填工艺发展历程

本文在梳理国内外充填工艺发展历程相关文献时，主要收集并分析了 1985—2025 年间发表的文献。从年份分布来看，文献数量整体呈由少到多、由缓慢增长到快速攀升的趋势，反映了该领域从理论探索到工程应用、再到智能化升级的演进脉络。文献年份分布趋势如图 1 所示。

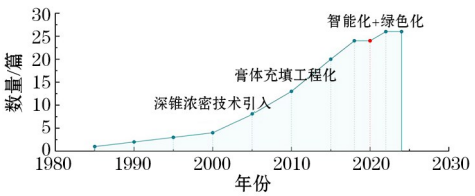


图 1 文献年份分布趋势

Fig.1 Trends in the annual distribution of literature

国内外矿山充填技术的发展经历了干式充填、水砂充填、胶结充填和膏体充填四个主要阶段，其演进脉络清晰地反映了充填采矿技术从粗放型向精细化、绿色化发展的整体趋势。国内外充填工艺的发展阶段及典型矿山见表 1。

表 1 国内外充填工艺的发展阶段及典型矿山

Table 1 Development stages of backfill technology and typical mines at home and abroad

阶段	时间	充填工艺	国外典型矿山	国内典型矿山	主要技术特征
干式充填	20 世纪 50 年代以前	废石/木材干式充填	澳大利亚芒特莱尔/北莱尔矿 加拿大霍恩矿	上宫金矿 华铜铜矿 青龙沟金矿	充填体强度低、密实度差，作业效率低下。
水砂充填	20 世纪 40—70 年代	分级尾砂/河砂水力管道输送	澳大利亚 Broken Hill South 矿 美国 Mayflower 矿	凡口铅锌矿 锡矿山南矿 三山岛金矿	管道输送料浆浓度低，采场脱水困难，细粒尾砂流失严重。

续表

阶段	时间	充填工艺	国外典型矿山	国内典型矿山	主要技术特征
胶结充填	20 世纪 50—80 年代	分级尾砂＋硅酸盐水泥	加拿大哈迪矿 澳大利亚芒特艾萨矿	凡口铅锌矿 黄沙坪铅锌矿 康家湾铅锌矿 金川二矿区	充填体具备自立性,强度显著提升;尾砂利用率低,水泥消耗量大,成本较高。
膏体充填	21 世纪 70 年代末至今	全尾砂膏体充填管道输送	德国 Bad Grund 铅锌矿 美国 Lucky Friday 矿 加拿大 Creighton 矿 澳大利亚 Cannington/Mount Isa 矿 南非 TauTona 金矿	马坑铁矿 陈旗天宝铁矿 会泽铅锌矿 黄沙坪铅锌矿 远景钨矿	浓度高,全尾砂利用率高;系统设备投资大。

1.1 国外充填工艺发展历程

干式充填阶段是充填技术的萌芽期。16 世纪,墨西哥部分矿山最早采用木材和废石充填采空区,主要目的是为采矿作业创造安全的工作平台[10]。进入 20 世纪初,澳大利亚塔斯马尼亚的芒特莱尔矿和北莱尔矿开始进行废石干式充填实践[11],加拿大诺兰达公司霍恩矿于 20 世纪 30 年代将粒状炉渣与磁铁矿混合充入采空区[12]。该阶段充填体强度低、密实度差,作业效率低下,难以满足大规模采矿生产的需求[13]。水砂充填阶段标志着充填技术开始向管道化输送方向发展。1944 年,澳大利亚 Broken Hill South 矿率先实现井下充填全流程水力输送,将分级尾砂或河砂与水混合后通过管道泵送至采空区,借助重力沉降脱水固结[14]。美国 Mayflower 矿随后也成功应用了水力充填技术[15]。水砂充填大幅提升了充填能力和输送效率,但仍存在料浆浓度低、采场脱水困难、细颗粒尾砂流失严重、充填体强度不足等问题[16]。胶结充填阶段是充填技术的重大突破时期。1957 年,加拿大鹰桥公司哈迪矿首次采用分级尾砂＋硅酸盐水泥进行胶结充填并成功应用于生产,使充填体获得了自立性,强度显著提升[17]。澳大利亚芒特艾萨矿于 1969 年开始采用水泥胶结充填回采底柱,并于 1977 年与高校合作开发出以炉渣为辅助胶凝材料的低成本胶结充填工艺[18-19]。胶结充填的出现使充填采矿法具备了更广泛的适用性,但分级尾砂工艺导致大量细粒级尾砂流失,尾砂利用率仅 50%～60%,水泥消耗量大,充填成本仍然较高[20-24]。膏体充填阶段,1979 年,德国 Bad Grund 铅锌矿建成世界首个膏体充填系统,率先将全尾砂浓缩至高浓度膏体状态进行管道输送[25-28]。此后,美国 Lucky Friday 矿于 1985 年首次采用全尾砂膏体充填,加拿大 Creighton 矿于 1992 年跟进应用[29-32]。澳大利亚 Cannington 矿于 1997 年建成大型地下膏体充填系统[33-34],Mount Isa 矿于 1998 年建成适配 3 500 m 深部开采的膏体充填系统[35]。南非 TauTona 金矿等超深井矿山也在深部开采中广泛应用膏体充填技术[36]。膏体充填采用不脱泥的全尾砂作为充填骨料,料浆具备不分层、不离析、不脱水的“三不”特性,全尾砂浆通过浓密机高效脱水后经管道自流或泵压输送,实现了尾砂的全量利用和充填体的高强度可控[37]。2020 年,厄瓜多尔 Lundin Gold 公司 Fruta del Norte 金矿建成膏体充填系统并成功投产,采用“浓密＋压滤”两段脱水工艺,在热带雨林敏感环境条件下实现了充填系统的稳定运行。2021 年,加拿大 Evolution Mining 公司 Red Lake 金矿开展了膏体充填连续浇筑工艺的系统研究与工业试验,通过现场仪器监测与强度测试验证了连续充填的可行性。2024 年,美国 Rio Tinto Kennecott 公司 Bingham Canyon 矿完成了膏体充填系统可行性研究,采用浓密机与过滤机组合工艺,设计建设 8 km 长距离管道输送系统。

1.2 国内充填工艺发展历程

我国矿山充填技术的发展起步较晚,但发展速度迅猛,在吸收国外先进经验的基础上,结合国内矿山实际条件,逐步形成了具有中国特色的充填技术体系[38-40]。全尾砂膏体充填技术研究框架如图 2[41-73]所示。

20 世纪 50 年代,我国矿山开采技术水平整体落后,干式充填是当时主要的充填方式[41-43]。早期以辽宁杨家杖子钼矿等有色金属矿山为代表,采用废石、砂石等干式材料,通过矿车或风力等方式输送至采空区。华铜铜矿开展了干式充填实践;青龙沟金矿改进了分段充填采矿法(Avoca 采矿法),并配套干式充填[44]。20 世纪 60—70 年代,以 1965 年从瑞典引进的分级尾砂充填技术为标志,锡矿山南矿开始采用尾砂水力输送充填工艺[45-46],凤凰山铜矿率先开展分级尾砂充填工业试验[47-48]。水砂充填以尾砂或河砂为充填骨料,将充填骨料与水混合后通过管道自流输送至采空区,利用重力沉降脱水固

结，充填能力大、投资相对较小，能有效减缓地表下沉[49]。1968 年，凡口铅锌矿首次采用分级尾砂和水泥胶结充填，开创了我国胶结充填的先河[50-52]。20 世纪 80 年代初，凡口铅锌矿进一步开展了高浓度全尾砂胶结充填攻关试验[53]，金川二矿区也较早开展了分级尾砂胶结充填实践。在 20 世纪 80 年代，胶结充填通常以分级尾砂为充填骨料，添加水泥等胶凝材料制成胶结充填料浆，充填体强度显著提升，具有自立性。然而，分级工艺导致大量细粒级尾砂流失，尾砂利用率仅 50%～60%，仍需建设尾矿库堆存溢流细砂，充填成本较高[54-56]。1994 年，金川二矿区建成我国首套膏体泵送充填系统，料浆底流质量浓度达 70%，标志着我国充填技术进入膏体充填时代[57-58]。1999 年，铜绿山铜矿建成国内第二套膏体充填系统[59]。2006 年，会泽铅锌矿建成国内首套深锥浓密膏体充填系统，充填采矿法的矿石回采率达 98.95%，并实现了尾矿零排放，成为我国膏体充填技术发展的里程碑[60-62]。此后，膏体充填技术在我国有色、黄金等矿山领域得到快速推广[63-64]。李楼铁矿建成 750 万 t/a 大流量全尾砂充填系统；张庄铁矿成功应用超细全尾砂大流量连续充填技术；紫金山金铜矿创新性地采用浓密机加砂仓联合充填工艺[65]。万城矿业也完成了大流量、低成本膏体充填系统的建设与应用[66]。膏体充填采用全尾砂作为充填骨料，料浆质量浓度通常超过 70%，充填体强度高、整体性好[67-69]，但该技术仍面临工艺流程复杂、系统设备投资大、关键装备要求高、超细尾砂条件下充填体早期强度发展缓慢等挑战，充填成本仍需持续降低[70]。

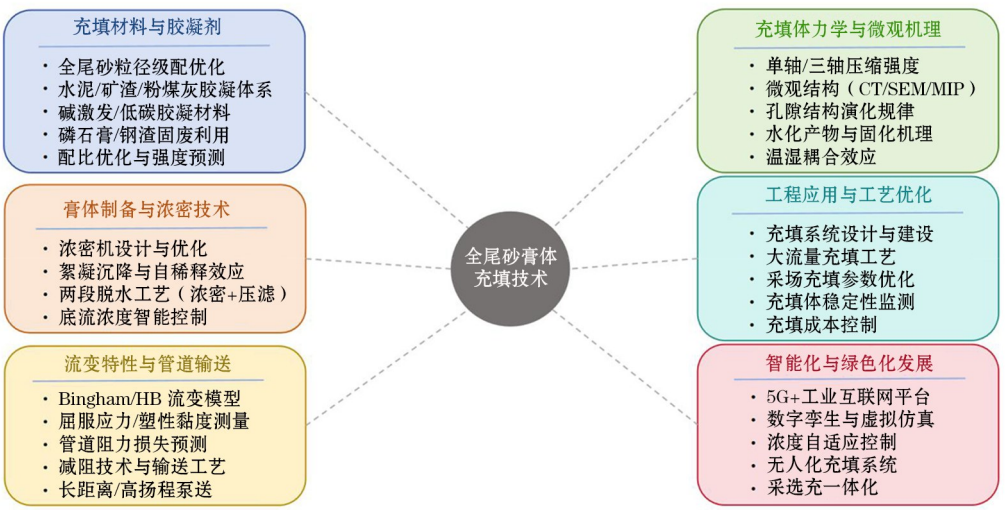


图 2　全尾砂膏体充填技术研究框架

Fig.2　Research framework of unclassified tailings paste backfill technology

近年来，全尾砂膏体充填技术在国内多座矿山加速落地应用，形成了覆盖多矿种、多场景的工程实践体系。郴州柿竹园多金属矿率先采用全尾砂膏体充填工艺，建设膏体仓储式浓密系统，持续推动尾砂充填技术向大规模、高效化、智能化方向迈进。2021 年，黄沙坪多金属矿将早期砂仓式充填系统废弃，依托“无尾矿山固废大能力仓储膏体充填成套技术与装备”项目成果，改用多金属全尾砂膏体充填系统，并于 2025 年进一步推进铅锌尾砂资源化利用项目，形成了覆盖多金属和铅锌尾砂的全尾砂膏体充填体系。目前该矿的充填系统运行稳定，总尾砂排放量减少 90%以上，正朝着无尾绿色矿山目标稳步推进。2022 年，衡阳远景钨业建成全尾砂胶结充填系统，采用膏体仓储式浓密系统，建设了“无尾矿山大仓储能力智能充填系统”。2026 年，龙岩市天山矿业尾矿资源综合利用项目作为福建省重点项目，同样采用全尾砂膏体充填工艺。上述工程实践表明，膏体充填技术应用向多矿种、跨区域规模化推广方向快速发展，膏体仓储式浓密机已成为当前全尾砂膏体充填领域最具综合优势的核心装备之一。

针对全尾砂细粒含量高、浓密脱水难度大的特点[71]，目前使用的核心工艺路线为低能耗絮凝、高效浓密、精准放砂、膏体泵送，膏体充填工艺流程如图 3 所示。工艺流程为：选厂尾矿浆经管道输送至充填站后，首先进入膏体仓储式浓密机进行絮凝沉

降和底流浓缩;浓缩后的高浓度底流进入搅拌系统,与胶凝材料和水按设定配比混合搅拌,制备成膏体料浆;最终通过充填工业泵或自流方式输送至井下采空区。该工艺的技术特点包括:采用膏体仓储式浓密机替代传统"高效浓密机+砂仓"两段式工艺,占地面积减少 40%,投资成本降低 25%~30%;搭配高密充填方案,全尾砂利用率可达 95%~100%,实现尾砂零排放;适用于矿山全尾砂,对尾砂颗粒粒径的适应性强。目前该工艺已被成功应用于柿竹园多金属矿、黄沙坪铅锌矿、陈旗天宝铁矿等多个矿山,形成了一套成熟的工艺设计方法和标准化的设备配置方案[72-73]。

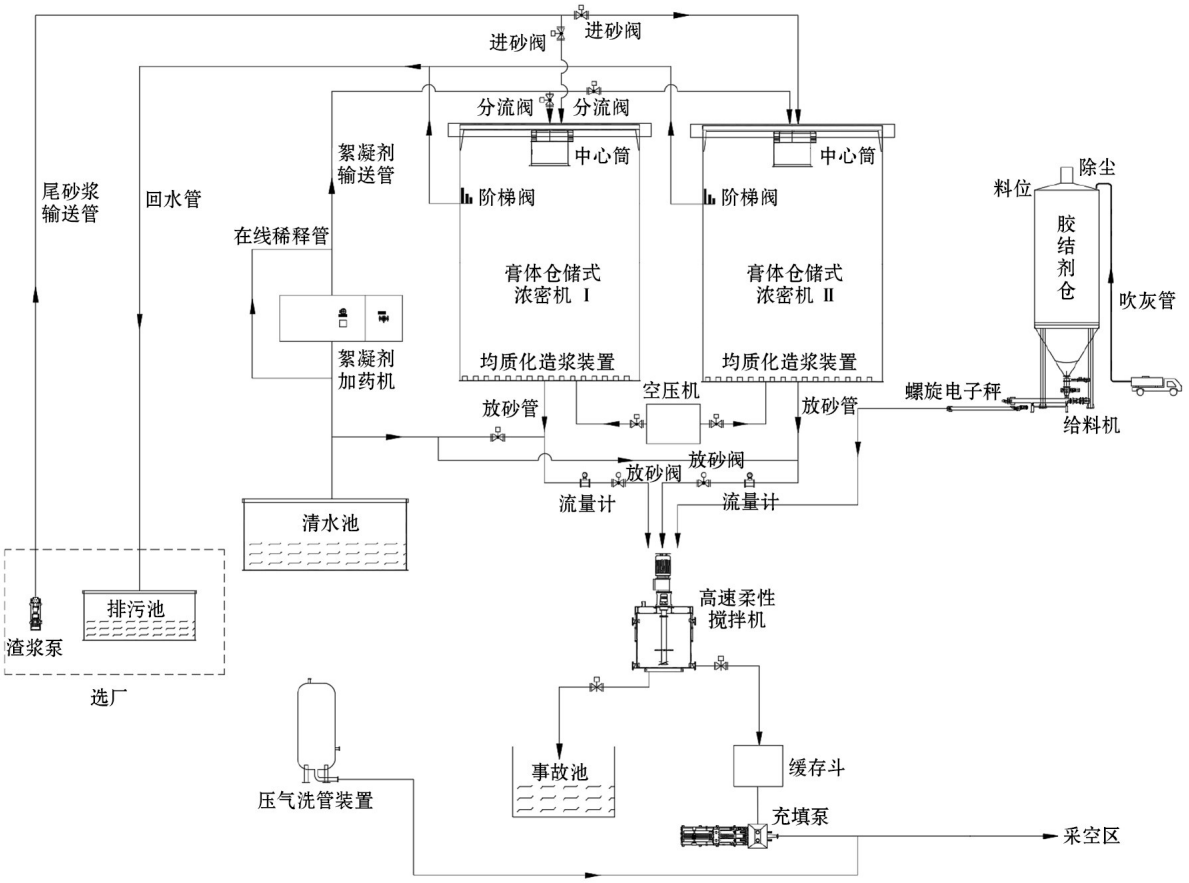


图 3 膏体充填工艺流程

Fig.3 Process flow of paste backfill technology

2 膏体充填技术体系的突破与完善

2.1 膏体充填技术体系

2.1.1 尾砂浆低能耗絮凝协同高浓度稳定放砂技术

尾砂的高效浓密脱水是膏体充填工艺流程中关键的预处理环节,直接影响底流浓度的稳定性、絮凝剂消耗量和后续膏体制备质量。学者们围绕浓密机内复杂的固液分离过程开展了持久的理论探索与试验研究,在絮凝沉降动力学、泥层压缩理论和底流浓度预测方法等方面取得了重要进展[74-76]。尾砂浆低能耗絮凝协同高浓度稳定放砂技术路线如图 4[74-87]所示。

(1) 低耗高效絮凝沉降体系。针对全尾砂浆中细粒含量高、自然沉降速率慢的难题,研发了尾砂絮凝沉降动态调控技术。在絮凝沉降机理研究方面,学者们基于颗粒间碰撞-聚集的经典德查金-朗道-费韦-奥弗贝克(DLVO)理论,结合尾砂浆中细粒颗粒的表面电化学特性,建立了适用于全尾砂体系的絮凝沉降动力学模型[77-79]。研究发现,絮凝剂的分子量、离子类型和最佳投加量均与尾砂的矿物组成和细颗粒含量密切相关,阴离子型聚丙烯酰胺在大多数金属矿尾砂中表现出最佳的絮凝效果。通过大量沉降柱试验,揭示了膏体仓储式浓密机内特殊的"自稀释效

应”,即高浓度底流区的压缩液向上穿过滤层时产生的稀释作用,可显著降低上层给料的等效浓度,从而在不增加絮凝剂用量的条件下提高沉降通量[80-82]。通过优选阴离子型聚丙烯酰胺絮凝剂的种类并优化其掺量,实现了低能耗絮凝条件下的快速沉降。

(2) 膏体仓储式浓密机底流浓度精准控制。在浓密机底流浓度预测与调控方面,学者们建立了基于泥层界面位置实时监测的底流浓度预测模型,实现了浓密过程的动态调控与优化[83]。通过浓密机泥层高度与底流浓度的耦合调控,建立了底流浓度多参数预测模型,有效避免了传统工艺中底流浓度波动导致的放砂不稳定问题。

(3) 高浓度稳定放砂工艺。膏体仓储式浓密机将深锥浓密机与立式砂仓的功能合二为一,采用新型絮凝剂多点稀释给料技术,该技术已在多座不同类型的矿山成功应用。例如蒙金选厂的尾砂浓密系统长期受“压耙”问题困扰,采用膏体仓储式浓密机后,底流浓度及放砂稳定[84-88]。

(4) 智能化絮凝控制与放砂联动。基于在线浓度检测与智能算法,实现了絮凝剂自动投加与底流放砂的协同控制。陈国辉等[55]以柿竹园多金属矿为工程背景,探讨了智能矿山建设中充填系统的数字化升级路径,涵盖充填过程自动化控制、设备远程监控和生产数据智能分析等内容。

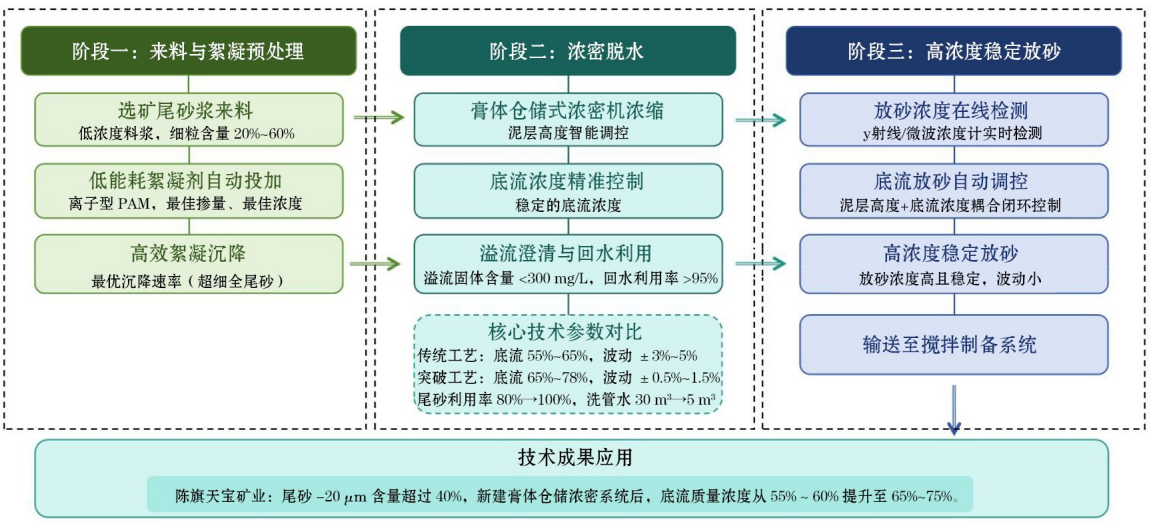


图 4 尾砂浆低能耗絮凝协同高浓度稳定放砂技术路线

Fig.4 Technical route of low-energy-consumption flocculation of tailings slurry combined with high-concentration stable sand discharge

2.1.2 多组分物料膏体高质量制备协同可靠输送技术

在多组分物料精准配比与均质化制备方面,研发了多点给料、一段式连续搅拌的膏体精准制备工艺,实现了尾砂、粗骨料、胶凝材料和水等多组分物料的连续计量与配比控制。多组分物料膏体高质量制备协同可靠输送技术路线如图 5[89-90]所示。

(1) 结构流体流变特性调控。姚中亮[61]推导的结构流体管道输送阻力公式已成为国内膏体充填管道输送设计的基础理论公式。基于结构流体理论,料浆屈服应力大于 0 可有效阻止固体颗粒沉降,建立了流变参数与充填工艺参数的定量关系模型。

(2) 全尾砂膏体充填理论体系。国内学者在全尾砂膏体充填理论体系的构建方面做出了系统性贡献,形成了以膏体流变学为核心、以充填体强度理论为支撑的理论框架。吴爱祥等[39]率先从膏体的定义与分类入手,系统构建了涵盖膏体流变学基础理论、充填体强度设计方法和全尾砂浓密理论的完整学术体系。

(3) 大流量高可靠管道自流输送。学者们开发了高浓度料浆管道自流输送工艺参数设计方法,形成了高浓度、充填倍线 3～5、自流输送的标准化工艺体系。例如,李楼铁矿采用大流量结构流自流充填技术,单系统充填能力达到 150～180 m^3/h[89-90]。

(4) 低成本绿色胶凝材料开发。针对充填成本

居高不下的痛点,研发了水泥+粉煤灰/矿渣等工业固废复合胶凝体系。三贵口铅锌矿研发了以水泥和粉煤灰为原料的低成本胶结剂,并采用多仓配置的多微粉添加技术,实现了多种低成本胶结剂的精准添加,大大降低了充填成本,综合充填成本仅 39 元/m^3[59]。

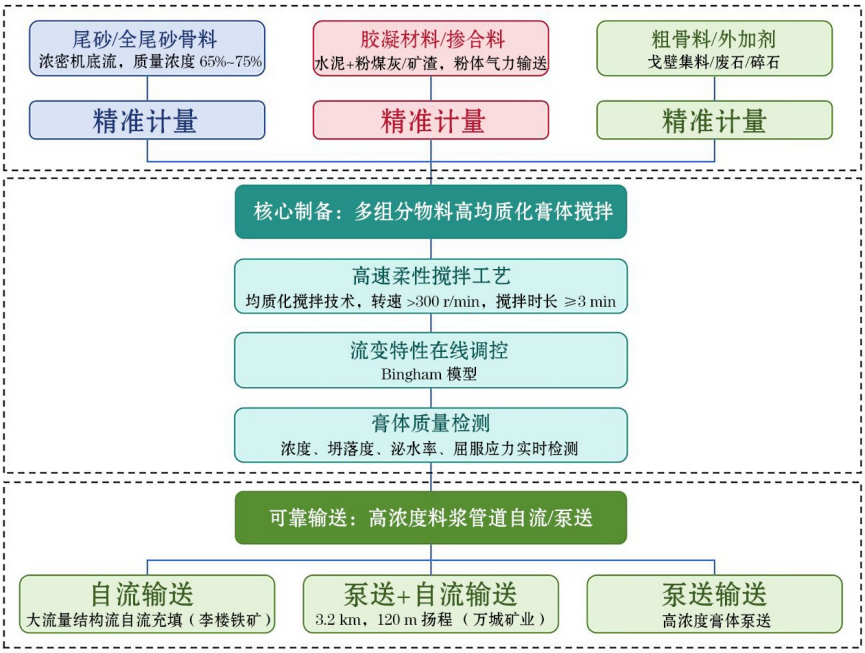


图 5 多组分物料膏体高质量制备协同可靠输送技术路线

Fig.5 Technical route of high-quality preparation of multi-component paste combined with reliable transportation

2.1.3 超深井膏体调压输送与充填安全管控技术

深部开采是我国金属矿业面临的重要战略课题,也是充填技术发展的重要驱动力。国内学者围绕深部开采面临的高地应力、高井温、高渗透压"三高"环境对充填技术提出的新挑战,从战略规划、理论研究和技术开发等多个层面展开了系统的研究。蔡美峰等[47]从国家矿产资源安全战略的高度出发,全面分析了我国金属矿深部开采的现状、面临的重大技术瓶颈和未来发展方向,指出深部开采必须走安全、高效、绿色、智能的可持续发展道路。超深井膏体调压输送与充填安全管控技术路线如图 6[91-95]所示。

(1) 深井膏体调压输送工艺。针对超深井充填面临的管道压力高、磨损严重、输送阻力大等难题,研发了多级调压输送工艺。高峰锡矿采用"高位浓密+自流输送"模式,利用深井天然高倍线优势(充填倍线 3~5),实现了稳定自流充填。万城矿业充填系统采用串联渣浆泵加压输送工艺,实现了 3.2 km 长距离、120 m 高扬程输送,充填能力达到 80~200 m^3/h,解决了超长距离膏体输送的瓶颈问题[65]。

(2) 管道压力监测与输送安全管控。通过沿程布置压力传感器建立了充填管线压力实时在线监测系统。开发了基于压力梯度的管道堵塞预警算法,当压力梯度超过设定阈值时自动触发反冲洗或停机保护。针对超深井管道磨损问题,采用内径 80~150 mm 的耐磨合金钢管,并在高磨损段加设耐磨衬里,使管道使用寿命延长 2~3 倍。

(3) 充填体强度与采场稳定性协同调控。建立了深部采场充填体强度设计方法,根据采场一步骤/二步骤等不同类型、矿体赋存条件和开采深度差异化设计充填配比。金川二矿区大体积充填体采用差异化强度设计,现场取芯实测强度优于二步骤采场设计强度,并通过多点位移计与应力计监测,建立了充填体-围岩协同承载模型[73]。

(4) 充填系统模块化集成与应急安全保障。郑伯坤等[7]针对充填技术发展与推广应用中存在的问题,提出了模块集成充填技术的研发思路,以其独特的技术思路和实施工艺,解决了中小型矿山应用充填过程中的投资问题、技术人员配备问题和运营成本高等问题。

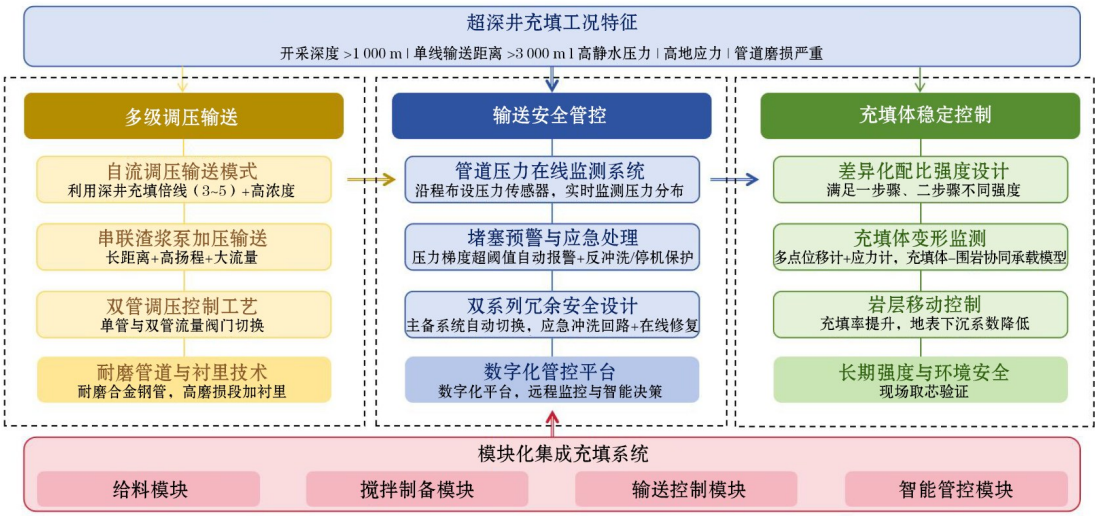


图 6　超深井膏体调压输送与充填安全管控技术路线

Fig.6　Technical route of paste pressure-regulated transportation and filling safety control for ultra-deep shafts

2.2　膏体充填关键装备研发

近五年来，国内在充填关键装备自主研发方面取得了重要进展，逐步形成了涵盖膏体仓储式浓密机、高速柔性搅拌机、充填工业泵、风水联动洗管装备等核心装备的技术体系。充填关键技术、装备及材料如图 7 所示。



图 7　充填关键技术、装备及材料

Fig.7　Key technologies, equipment and materials for backfill

膏体仓储式浓密机是一种集尾砂浓密与存储功能于一体的充填装备，其核心在于将浓密机与立式砂仓的功能整合于同一设备。尾砂进入浓密机后依次完成絮凝沉降与底流压缩两个过程。与传统“高效浓密机＋砂仓”两段式工艺相比，采用膏体仓储式浓密机后，充填系统的占地面积减少约 40%，单台处理能力可达 25～250 t/h。该装备主要由仓储系统、中心桶给料系统、阶梯阀排水系统、流态均质造浆系统和放砂系统组成，可满足尾矿浆体固液分离、均质稳态放料及料浆可靠仓储等工艺要求，具有处理能力大、放砂浓度高、浓度波动小、适用于全尾砂、低能耗和占地面积小等特点。

高速柔性搅拌机是膏体高质量制备的关键装备。针对传统搅拌机存在的搅拌不均、能耗高、磨损

快等问题,相关研究提出了一段式高速柔性搅拌机方案。该装备采用立式中心搅拌结构,搅拌器为桨式设计,搅拌轴中部安装环形链条,上部和下部均安装倾斜叶片。在变频电机驱动下,通过高速旋转与“软硬”协同搅拌方式,可有效解决细颗粒物料易结团、不易打散、搅拌不均等工程难题,使搅拌桶内物料实现均匀混合。

充填工业泵是高浓度膏体管道输送的动力核心。目前主要有锥阀式和隔膜式两种技术路线。锥阀式充填工业泵采用提升式锥阀结构作为分配阀,其阀组具备单向通行功能,可有效阻断管路中的物料回流,适用于长距离及高扬程充填工况,出口压力稳定,易损件寿命较传统方案提高约 2～3 倍,配件成本降低约 80%。在换向控制方面,采用位移感应换向缓冲技术,换向油缸配备高精度非接触式位移检测装置,内置诊断功能可对位移信号进行实时监测与诊断测试,确保精确换向。控制系统对设备运行状态进行在线监测,输出实时工况曲线,通过智能算法对数据进行分析,实现故障自诊断与设备自调节。隔膜式充填工业泵是针对充填工程发展的一种新型料浆输送设备。与传统充填工业泵相比,隔膜式充填工业泵具有输送压力高、流量大、效率高、全天候运行、输送连续、无换向冲击等优点,且易损件消耗显著降低,是超长距离管道化膏体输送和大高差向上充填的可行技术方案。

风水联动洗管装备是用于井下充填管路清洗与管道疏通的专用设备。该设备综合了单独风洗和水洗两种方式的技术优点,同时避免了两种方式单独使用的不足。洗管过程由自动控制系统完成,无需人员操作,控制系统通过液晶显示屏实时显示液位、气压等系统参数及阀门状态。利用压缩空气与水气化混合,形成高速流动的气水混合束流,对管道侧壁进行冲刷清洗,从而实现快速洗管。对于长度为 2 000 m 的管道,用水量约 2 m^3,可在 5 min 内完成洗管,管道内无残留。

黏性尾砂配料机是针对矿山间断充填系统中物料制备需求开发的一种物料打散设备。碎石配料机则适用于碎石、干砂、河砂等物料的缓存与给料作业。在胶凝材料方面,水泥作为传统胶凝材料虽应用广泛,但其成本较高且并非充填专用材料[96]。矿山充填专用胶凝材料既可用于矿山充填、地下注浆、道路建设等领域,也可用于采空区堵漏、灭火、阻燃,以及巷道漏风缝隙与上山区域防灭火充填。在相同料浆条件下,新型胶凝材料的用量和成本均低于普通水泥,具有较好的经济性[97-98]。

3 工程实践与典型案例

近年来,全尾砂膏体充填技术与装备已在多个大型矿山成功落地应用,形成了涵盖不同矿种、不同开采条件的多样化工程实践。以下为四个标志性工程案例,充填站现场如图 8 所示。

(1) 柿竹园多金属矿:全尾砂膏体充填系统建设。如图 8(a)所示,柿竹园多金属矿的空区充填治理采用全尾砂膏体充填工艺,全尾砂－75 μm 颗粒含量约为 65.70%,－20 μm 细颗粒含量为 31.18%。柿竹园充填系统日处理尾砂 3 200 t,日充填量 2 800 m^3,单套充填系统设计能力 90～100 m^3/h(共两套)。充填站质量浓度与放砂流量稳定,充填系统生产能力可满足 8.0×10^5 m^3/a 的采空区治理需求。充填系统投产后运行稳定,充填体强度满足采矿需求,有效支撑了智能矿山建设进程。

(2) 河南中加矿业:膏体仓储式浓密充填系统建设。如图 8(b)所示,河南中加矿业充填站的设计充填能力为 200 万 m^3/a,服务多个采区的同时充填作业。项目配备 Φ12 m×20 m 膏体仓储式浓密机 4 台、高速柔性搅拌机 4 台、锥阀式充填工业泵 2 台,采用自流与泵送相结合的方式,实现近 500 m^3/h 的高效充填能力。项目可盘活铁矿资源储量约 2 亿 t,延长矿山服务年限 15 a 以上,减少尾矿库占地约 3 000 亩。



(a) 柿竹园东波充填站 (b) 河南中加矿业充填站

图 8 充填站现场

Fig.8 Site view of the backfill station

(3) 广宁葫芦花岗岩矿与德庆花岗岩矿:充填技术向砂石骨料行业的跨界延伸。广宁葫芦花岗岩矿和德庆花岗岩矿是两个典型的砂石骨料矿山,其采矿废渣的处理一直是环保难点。这两个矿山打破传统思维,将膏体充填技术跨界应用于砂石骨料行

业:配套提供了自主研发的无动力仓储浓密机,采用“无动力仓储浓密机+絮凝剂自动添加系统”工艺,实现污泥快速沉降浓缩,溢流清水回用于洗砂工序;以碎石屑和石粉为主体骨料,通过配比优化形成膏体充填材料;采用充填法对露天采坑进行生态修复治理,将废渣充填至采空区并进行复绿。两个项目的成功实施,不仅解决了砂石骨料矿山的废渣堆存的环保难题,更开创了膏体充填技术在非金属矿山应用的先河,为充填技术的行业跨界推广应用提供了可复制的范例。

(4) 昆阳磷矿二矿:露天坑固化堆存与充填系统的协同治理。昆阳磷矿二矿面临大型露天采坑和地下采空区双重治理的难题。该矿采用“露天坑固化堆存+地下充填”协同治理方案:对地下采空区实施膏体充填,采用磷石膏基胶凝材料替代水泥;利用露天坑实施尾砂固化堆存,通过添加固化剂使尾砂堆存体形成一定强度,既可承载覆土复绿,又可防止雨水冲刷和渗漏污染;建立地表-地下联合监测网络,实时监控露天坑堆存体稳定性、地下水位变化和充填体应力状态。该协同治理方案实现了露天坑和地下采空区的同步治理。

4 发展趋势与未来展望

尽管全尾砂膏体充填技术已取得快速进步,但从梳理的文献来看,现有研究仍存在以下不足,亟须在后续工作中加以突破。

(1) 膏体流变学基础理论体系尚不完善,需推进膏体多尺度理论模型研究。现有流变模型多以Bingham塑性模型为框架,但该模型对膏体在低剪切速率下的复杂非线性行为描述能力有限,尤其在高浓度和超细尾砂(-37 μm含量>85%)的条件下,膏体呈现的触变性、黏弹性和时间依赖性等特征尚未得到充分的理论解释,难以实现定量预测,对这些特征的认识尚未形成统一的理论框架。

(2) 开发适用于复杂尾砂特性的低成本、低碳胶凝材料体系。在“双碳”战略驱动下,低碳胶凝材料的研发与应用成为热点。利用钢渣、矿渣、粉煤灰、磷石膏等工业固废替代水泥,可大幅降低充填成本与碳排放。但超细尾砂比表面积大、需水量高,导致充填体早期强度发展缓慢、凝结时间延长,严重制约了充填循环作业效率。现有研究中,通过添加早强剂、优化胶凝材料体系等措施虽取得一定成效,但尚未形成适用于复杂特性尾砂的系统解决方案。

(3) 构建深部开采条件下充填系统的设计理论和方法。面向超过1 000 m的深部开采,现有研究仍存在以下不足:高温、高压环境下充填体水化反应动力学及强度演化规律方面的试验数据积累不足,高应力条件下充填体的长期蠕变特性及其与围岩协同承载机制的理论模型尚不完善;针对深部复杂地质条件的充填体-围岩相互作用机制仍需深入研究。

5 结论

(1) 矿山充填技术的发展经历了干式充填、水砂充填、胶结充填、膏体充填四个阶段。在国外,1979年德国Bad Grund矿建成世界首个全尾砂膏体充填系统。在国内,自1994年金川二矿建成首套膏体泵送充填系统以来,以长沙矿山研究院有限责任公司充填团队为代表的工程技术人员在大流量输送、膏体制备、深井充填和低成本胶凝材料开发等方面积累了丰富经验。

(2) 在技术体系层面,全尾砂膏体充填已形成了以尾砂浆高效浓密、膏体搅拌制备及膏体稳定输送等为核心的关键技术。配套的膏体仓储式浓密机、高速柔性搅拌机、锥阀式充填工业泵等关键装备在自主研发方面取得了重要进展。

(3) 膏体仓储式浓密系统已在柿竹园多金属矿、河南中加矿业、广宁葫芦花岗岩矿与德庆花岗岩矿、昆阳磷矿二矿等多场景应用中得到成功验证,膏体充填技术正朝多矿种、跨区域规模化推广方向快速发展,膏体仓储式浓密机已成为当前全尾砂膏体充填领域具有综合优势的核心装备。

(4) 现有研究仍存在一些不足亟待突破:膏体流变学多尺度理论模型尚不完善;尚需开发适用于复杂尾砂特性的低成本、低碳胶凝材料体系;深部充填的理论研究及实践积累仍相对薄弱。未来需通过自主研发及集成创新,推动膏体充填技术持续发展。

参考文献(References):

[1] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向2035年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
Guo Qifeng, Cai Meifeng, Wu Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(4):476-486.

[2] 刘福春,熊有为,刘恩彦,等.金属矿山大流量充填技术的应用及发展趋势[J].矿业研究与开发,2021,41(1):34-38.
Liu Fuchun, Xiong Youwei, Liu Enyan, et al. Application and development trend of large flow filling technology in metal mine[J]. Mining Research and Development,2021,41(1):34-38.

[3] 郑伯坤,姚维,黄腾龙,等.基于环管试验的改性全尾砂充填料浆输送性能[J].中国有色金属学报,2021,31(2):520-529.
Zheng Bokun, Yao Wei, Huang Tenglong, et al. Transportable performance of modified unclassed tailings filling slurry based on loop test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(2):520-529.

[4] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
Guo Lijie, Liu Guangsheng, Ma Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(12):4182-4200.

[5] 许良发,姚维,黄腾龙,等.杨家沟铝土矿充填材料配比优化研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(2):92-99.
Xu Liangfa, Yao Wei, Huang Tenglong, et al. Research on optimization of filling material proportion in Yangjiagou Bauxite Mine[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2022,4(2):92-99.

[6] 彭亮,康瑞海,林景尚,等.龙桥铁矿全尾砂胶结充填系统的设计与应用[J].矿业研究与开发,2018,38(9):12-16.
Peng Liang, Kang Ruihai, Lin Jingshang, et al. Design and application of full tailing cemented filling system for Longqiao Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2018,38(9):12-16.

[7] 郑伯坤,江飞飞,李向东.模块集成充填技术[J].矿业研究与开发,2016,36(10):49-53.
Zheng Bokun, Jiang Feifei, Li Xiangdong. Module integrated filling technology[J]. Mining Research and Development,2016,36(10):49-53.

[8] 黄腾龙,郑伯坤,李向东.挑水河磷矿充填系统智能化研究与应用[J].矿业研究与开发,2019,39(7):73-77.
Huang Tenglong, Zheng Bokun, Li Xiangdong. Research and application of intelligent filling system in Tiaoshuihe Phosphate Mine[J]. Mining Research and Development,2019,39(7):73-77.

[9] 江科,康瑞海,姚中亮,等.全尾砂最佳絮凝沉降浓度及调控方式研究[J].黄金科学技术,2019,27(3):440-448.
Jiang Ke, Kang Ruihai, Yao Zhongliang, et al. Study on the optimal concentration and controlling mode of whole tailings flocculation sedimentation[J]. Gold Science and Technology,2019,27(3):440-448.

[10] Yilmaz E, Benzaazoua M, Belem T, et al. Effect of curing under pressure on compressive strength development of cemented paste backfill[J]. Minerals Engineering,2009,22(10):772-785.

[11] Fall M, Pokharel M. Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills:portland cement-paste backfill[J]. Cement and Concrete Composites,2010,32(10):819-828.

[12] Ghirian A, Fall M. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments. Part Ⅰ: physical, hydraulic and thermal processes and characteristics[J]. Engineering Geology,2013,164:195-207.

[13] Cui L, Fall M. A coupled thermo-hydro-mechanical-chemical model for underground cemented tailings backfill[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2015,50:396-414.

[14] Pokharel M, Fall M. Combined influence of sulphate and temperature on the saturated hydraulic conductivity of hardened cemented paste backfill[J]. Cement and Concrete Composites,2013,38:21-28.

[15] Xu Wenbin, Zhang Yalun, Liu Bin. Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials,2020,254:119305.

[16] Liu Lang, Xin Jie, Qi Chongchong, et al. Experimental investigation of mechanical, hydration, microstructure and electrical properties of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials,2020,263:120137.

[17] Rankine R M, Sivakugan N. Geotechnical properties of cemented paste backfill from Cannington Mine, Australia[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2007,25(4):383-393.

[18] El-bouazzaoui A, Ait-khouia Y, Aurélie A, et al. Environmental desulfurization of mine tailings using froth flotation:the case of Amaruq Mine (Nunavut, Canada)[J]. Minerals Engineering,2022,187:107762.

[19] Aldhafeeri Zaid. Reactivity of cemented paste backfill[D]. Ottawa:University of Ottawa,2018.

[20] Abdul-Hussain N, Fall M. Thermo-hydro-mechanical behaviour of sodium silicate-cemented paste tailings in column experiments[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2012,29:85-93.

[21] Helinski M, Fahey M, Fourie A. Behavior of cemented paste backfill in two mine stopes: measurements and modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2011,137(2):171-182.

[22] El Mkadmi Nawfal, Aubertin Michel, Li Li, et al. Effect of drainage and sequential filling on the behavior of backfill in mine stopes[J]. Canadian Geotechnical Journal,2014,51(1):1-15.

[23] Daliri Farzad, Simms Paul, Sivathayalan Siva. Shear and dewatering behaviour of densified gold tailings in a laboratory simulation of multi-layer deposition[J]. Canadian Geotechnical Journal,2016,53(8):1246-1257.

[24] Yang Pengyu, Li Li. Investigation of the short-term stress distribution in stopes and drifts backfilled with cemented paste backfill[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2015,25(5):721-728.

[25] Liu Guangsheng. Stability analyses of vertically exposed cemented backfill:a revisit to Mitchell's physical model tests [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2016,26(6):1135-1144.

[26] Lu Hongjian, Qi Chongchong, Li Chenghe, et al. A light barricade for tailings recycling as cemented paste backfill[J]. Journal of Cleaner Production,2020,247:119388.

[27] Zheng Jian, Li Li. Experimental study of the "short-term" pressures of uncemented paste backfill with different solid contents for barricade design [J]. Journal of Cleaner Production,2020,275:123068.

[28] Li Li, Aubertin Michel, Belem Tikou. Formulation of a three dimensional analytical solution to evaluate stresses in backfilled vertical narrow openings [J]. Canadian Geotechnical Journal,2005,42(6):1705-1717.

[29] Li Li, Aubertin Michel. Horizontal pressure on barricades for backfilled stopes. Part Ⅱ: submerged conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal,2009,46(1):47-56.

[30] Berndt Christopher C, Rankine Kirralee J, Sivakugan Nagaratanm. Materials properties of barricade bricks for mining applications [J]. Geotechnical and Geological Engineering,2007,25(4):449-471.

[31] Belem T, El Aatar O, Bussière B, et al. Gravity-driven 1-D consolidation of cemented paste backfill in 3-m-high columns [J]. Innovative Infrastructure Solutions,2016,1(1):1-12.

[32] Mitchell R J, Smith J D, Libby D J. Bulkhead pressures due to cemented hydraulic mine backfills [J]. Canadian Geotechnical Journal,1975,12(3):362-371.

[33] Mitchell R J, Olsen Richard S, Smith John D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill[J]. Canadian Geotechnical Journal,1982,19(1):14-28.

[34] Wicklang Bengamin E, Wilson G Ward, et al. Self-weight consolidation of mixtures of mine waste rock and tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal,2005,42(2):327-339.

[35] Hughes P B, Pakalnis R, Hitch M, et al. Composite paste barricade performance at Goldcorp Inc. Red Lake Mine, Ontario, Canada.[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment,2010,24(2):138-150.

[36] Jaouhar El Mustapha, Li Li. Effect of drainage and consolidation on the pore water pressures and total stresses within backfilled stopes and on barricades[J]. Advances in Civil Engineering,2019,1:1-19.

[37] Peng X P, Guo L J, Liu G S, et al. Investigation of inhomogeneous properties of backfill samples to explore a new quantitative criterion for cemented paste backfill identification [C]//Paste 2021: Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics,2021:343-352.

[38] 盛佳,万文,张海云,等.金川二矿区上盘贫矿采矿方法优选及采动效应分析[J].地下空间与工程学报,2024,20(4):1389-1400.
Sheng Jia, Wan Wen, Zhang Haiyun, et al. Optimization of mining methods and analysis of mining effect for hanging wall low-grade ores in Jinchuan No.2 Mine Area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4):1389-1400.

[39] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(下):流变测量与展望[J].工程科学学报,2021,43(4):451-459.
Wu Aixiang, Li Hong, Cheng Haiyong, et al. Status and prospects of research on the rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part 2): rheological measurement and prospects[J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(4):451-459.

[40] 颜家成,张杰,雷战.我国有色金属矿地下开采方法概述及发展趋势[J].世界有色金属,2023(24):80-83.
Yan Jiacheng, Zhang Jie, Lei Zhan. Overview and development trend of underground mining methods for non-ferrous metal mines in China[J]. World Nonferrous Metals, 2023(24):80-83.

[41] 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.

[42] 阳京平.全尾砂膏体充填采矿技术现状及展望[J].中国矿业,2021,30(增刊1):17-23.
Yang Jingping. Current status and prospects of full tail paste filling mining technology[J]. China Mining Magazine,2021, 30(Suppl.1):17-23.

[43] 江科,康瑞海,姚中亮,等.基于正交试验的充填集料配比优化研究[J].矿业研究与开发,2019,39(1):28-31.
Jiang Ke, Kang Ruihai, Yao Zhongliang, et al. Optimization research on filling aggregate proportion based on orthogonal test[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(1): 28-31.

[44] 张雷,郭利杰,许文远,等.细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展[J].材料导报,2023,37(23):106-116.
Zhang Lei, Guo Lijie, Xu Wenyuan, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling: a review [J]. Materials Reports, 2023,37(23):106-116.

[45] 庞建涛,李树建,石勇,等.粗骨料充填输送管道阻力特性与冲蚀磨损研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):53-59.
Pang Jiantao, Li Shujian, Shi Yong, et al. Research on resistance characteristics and erosion wear of coarse aggregate filling transportation pipeline[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):53-59.

[46] 甘德清,孙海宽,刘志义,等.金属矿山充填料浆管道输送理论研究20 a进展与展望[J].金属矿山,2025(1):9-26.
Gan Deqing, Sun Haikuan, Liu Zhiyi, et al. Research progress and prospects of cemented tailings backfill slurry pipeline transport theory in metal mine for 20 years[J]. Metal Mine,2025(1):9-26.

[47] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[48] 王运敏.金属矿采矿工业面临的机遇和挑战及技术对策[J].现代矿业,2011,27(1):1-14.
Wang Yunmin. Opportunities and challenges to metal mine mining industry and the technical countermeasures[J]. Modern Mining,2011,27(1):1-14.

[49] 赵源,赵国彦,裴佃飞,等.地下金属矿绿色开采模式的内涵、特征与类型分析[J].中国有色金属学报,2021,31(12):3700-3712.
Zhao Yuan, Zhao Guoyan, Pei Dianfei, et al. Analysis on connotation, characteristics and type of green mining mode for underground metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(12):3700-3712.

[50] 彭亮,尹贤刚,仵锋锋,等.某铜矿充填分层离析现象分析与充填工艺优化[J].矿业研究与开发,2020,40(12):43-47.
Peng Liang, Yin Xian'gang, Wu Fengfeng, et al. Analysis of delamination and separation phenomenon of filling body and optimization of filling process in a copper mine[J]. Mining Research and Development,2020,40(12):43-47.

[51] 黄腾龙,曾凯,石勇,等.锥阀式充填泵阀隙流场的冲蚀磨损特性研究[J].矿业研究与开发,2025,45(8):226-235.
Huang Tenglong, Zeng Kai, Shi Yong, et al. Study on erosion wear characteristics of valve gap flow field in taper valve filling pump[J]. Mining Research and Development, 2025,45(8):226-235.

[52] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.
Zhao Xingdong, Zhou Xin, Zhao Yifan, et al. Research status and progress of prevention and control of mining disasters in deep metal mines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2522-2538.

[53] 江飞飞,周辉,刘畅,等.地下金属矿山岩爆研究进展及预测与防治[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):956-972.
Jiang Feifei, Zhou Hui, Liu Chang, et al. Progress, prediction and prevention of rock bursts in underground metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(5):956-972.

[54] 王勇,李健,王珍岐,等.金属矿充填固化过程监测研究现状及展望[J].金属矿山,2023(5):31-44.
Wang Yong, Li Jian, Wang Zhenqi, et al. Present situation and prospect of backfilling consolidation process monitoring for metal mine[J]. Metal Mine,2023(5):31-44.

[55] 陈国辉,郑伯坤,石勇,等.柿竹园多金属矿尾砂高浓度连续充填工艺的关键参数研究及应用[J].矿业研究与开发,2025,45(8):61-69.
Chen Guohui, Zheng Bokun, Shi Yong, et al. Research and application on key parameters of high concentration continuous filling process for tailings in Shizhuyuan Polymetallic Mine[J]. Mining Research and Development, 2025,45(8):61-69.

[56] 朗岩旺弦,赵金田,张金来,等.金川二矿区充填配合比优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):18-22.
Lang Yanwangxian, Zhao Jintian, Zhang Jinlai, et al. An optimization study on the filling mix ratio in Jinchuan No.2 Mining Area[J]. Mining Research and Development,2023, 43(11):18-22.

[57] 祖力亚尔·伊力夏提,陈寅,王恩祁,等.基于响应面法的废石-尾砂胶结充填体多因素强度优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(10):53-63.
Zuliyaer Yilixiati, Chen Yin, Wang Enqi, et al. Multi-factor strength optimization of waste rock-tailings cemented backfill based on response surface methodology[J]. Mining Research and Development,2025,45(10):53-63.

[58] 仵锋锋,王选,姚中亮,等.大流量连续胶结充填技术研究与应用[J].有色金属(矿山部分),2020,72(6):40-45+51.
Wu Fengfeng, Wang Xuan, Yao Zhongliang, et al. Research and application of high flow continuous cemented filling technology[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2020, 72(6):40-45+51.

[59] 仵锋锋.大能力低成本充填技术研究与应用[J].矿业研究与开发,2022,42(3):22-27.
Wu Fengfeng. Research and application of large-capacity and low-cost filling technology[J]. Mining Research and Development,2022,42(3):22-27.

[60] 罗佳,柳小胜,史群辉,等.地下矿山小型移动式充填系统研究与应用[J].矿业研究与开发,2020,40(3):33-36.
Luo Jia, Liu Xiaosheng, Shi Qunhui, et al. Research and application of small mobile filling system in underground mine[J]. Mining Research and Development,2020,40(3): 33-36.

[61] 姚中亮.结构流体胶结充填技术应用及展望[J].矿业研究与开发,2016,36(10):39-45.
Yao Zhongliang. Application and prospect of structural fluid cemented filling technology[J]. Mining Research and Development,2016,36(10):39-45.

[62] 阮竹恩,吴爱祥,王贻明,等.全固废膏体关键性能指标的多目标优化[J].工程科学学报,2022,44(4):496-503.

Ruan Zhuen, Wu Aixiang, Wang Yiming, et al. Multiple response optimization of key performance indicators of cemented paste backfill of total solid waste[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 496-503.

[63] 李成伟，祝鑫，彭亮，等.某铁矿全尾砂充填系统技改设计及应用研究[J].矿业研究与开发，2022，42(3)：158-162.
Li Chengwei, Zhu Xin, Peng Liang, et al. Technical modification design of a full tailings filling system and its application research in an iron ore[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 158-162.

[64] 胡亚军，陈彦亭，赖伟，等.超细全尾砂似膏体绿色胶凝充填关键技术研究[J].黄金，2023，44(5)：12-15+20.
Hu Yajun, Chen Yanting, Lai Wei, et al. Study of key technology of paste-like green cemented filling with ultra-fine ungraded tailings[J]. Gold, 2023, 44(5): 12-15+20.

[65] 康瑞海，王旭，仵锋锋，等.紫金山金铜矿全尾砂胶结充填技术研究与应用[J].矿业研究与开发，2018，38(3)：20-24.
Kang Ruihai, Wang Xu, Wu Fengfeng, et al. Research and application of full tailings cemented filling technology in the Zijinshan gold-copper mine[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(3): 20-24.

[66] 莫东旭，柳小胜，王长军.万城矿业全尾砂膏体充填系统扩能改造与应用[J].矿业研究与开发，2018，38(3)：11-15.
Mo Dongxu, Liu Xiaosheng, Wang Changjun. Expansive capability reform and application of the full tailings paste filling system in Wancheng Mining Industry[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(3): 11-15.

[67] 李翠平，黄振华，阮竹恩，等.金属矿膏体流变行为的颗粒细观力学作用机理进展分析[J].工程科学学报，2022，44(8)：1293-1305.
Li Cuiping, Huang Zhenhua, Ruan Zhuen, et al. Analysis of the research progress in the mechanism of particle mechanics action on the rheological behavior of paste in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(8): 1293-1305.

[68] 王小林，严庆文，王洪江，等.含粗骨料尾砂膏体长距离管输流变特性及阻力预测[J].哈尔滨工程大学学报，2024，45(3)：535-542.
Wang Xiaolin, Yan Qingwen, Wang Hongjiang, et al. Rheological properties and pipe resistance prediction of tailing paste containing coarse aggregate in long-distance transportation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(3): 535-542.

[69] 王连成，邵安林，曲福明，等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报，2025，47(5)：971-983.
Wang Liancheng, Shao Anlin, Qu Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(5): 971-983.

[70] 周子龙，王少锋，蔡鑫，等.深部金属矿异构环境爆破开采诱发岩体动力灾害防控[J].中国有色金属学报，2025，35(1)：306-322.
Zhou Zilong, Wang Shaofeng, Cai Xin, et al. Control for rock dynamic disasters induced by blasting mining disturbance under heterogeneous condition in deep metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(1): 306-322.

[71] 吴凡，杨发光，肖柏林，等.基于扩展度表征高浓度混合骨料充填料浆流变特性及应用[J].中南大学学报(自然科学版)，2022，53(8)：3104-3112.
Wu Fan, Yang Faguang, Xiao Bolin, et al. Characterization of rheological property and its application of high concentration mixed aggregate filling slurry based on spread[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3104-3112.

[72] 姚维，郑伯坤，邱景平，等.外加剂对膨胀充填材料性能的影响[J].材料导报，2022，36(增刊1)：578-582.
Yao Wei, Zheng Bokun, Qiu Jingping, et al. The influence of additives on the properties of expansion filling materials[J]. Materials Reports, 2022, 36(Suppl.1): 578-582.

[73] 彭府华，李庶林，李小强，等.金川二矿区大体积充填体变形机制与变形监测研究[J].岩石力学与工程学报，2015，34(1)：104-113.
Peng Fuhua, Li Shulin, Li Xiaoqiang, et al. Deformation monitoring of bulky backfill in No.2 mine area in Jinchuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 104-113.

[74] 孙光华，王玥，任伟成.胶结充填技术在金属矿山中的应用现状与发展趋势[J].有色金属(矿山部分)，2022，74(4)：26-33.
Sun Guanghua, Wang Yue, Ren Weicheng. Application status and development trends of cemented backfill technology in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74(4): 26-33.

[75] 杨玮，常东，龙涛，等.金尾矿资源化利用研究进展[J].矿产保护与利用，2023，43(3)：168-178.
Yang Wei, Chang Dong, Long Tao, et al. Research progress on the resource utilization of gold tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 168-178.

[76] 刘福春，白龙剑，严庆文，等.充填采场内膏体流动规律及接顶率预测模型[J].有色金属(矿山部分)，2023，75(3)：124-130+136.
Liu Fuchun, Bai Longjian, Yan Qingwen, et al. Flow law of paste in filling stope and prediction model of roof rate[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(3): 124-130+136.

[77] 邓代强，李夕兵，姚中亮，等.阿舍勒铜矿粗骨料充填料浆流动性能研究[J].有色金属工程，2016，6(1)：54-57.
Deng Daiqiang, Li Xibing, Yao Zhongliang, et al. Coarse aggregate filling slurry flow property of Ashele copper mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(1): 54-57.

[78] 杨晓炳，尹升华，郝硕，等.废石全尾砂高浓度充填料浆的均质化模型[J].工程科学学报，2022，44(7)：1115-1125.

Yang Xiaobing, Yin Shenghua, Hao Shuo, et al. Homogenization mathematical model of the cemented filling slurry with crushing waste rock and whole tailings[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(7):1115-1125.

[79] 何磊,马维清,焦志慧,等.极细高硫尾砂胶结充填料配比优化实验研究[J].中国矿业,2022,31(增刊1):388-391.
He Lei, Ma Weiqing, Jiao Zhihui, et al. Experimental study on optimization of cemented filler ratio of very fine high sulfur tailings[J]. China Mining Magazine,2022,31(Suppl. 1):388-391.

[80] 祝鑫,彭亮,尹旭岩,等.黄沙坪多金属矿全尾砂胶结充填试验研究及工程应用[J].矿业研究与开发,2022,42(8):83-86.
Zhu Xin, Peng Liang, Yin Xuyan, et al. Experimental study and engineering application of cemented filling with full tailings in Huangshaping polymetallic mine[J]. Mining Research and Development,2022,42(8):83-86.

[81] 刘浪,方治余,张波,等.矿山充填技术的演进历程与基本类别[J].金属矿山,2021(3):1-10.
Liu Lang, Fang Zhiyu, Zhang Bo, et al. Development history and basic categories of mine backfill technology[J]. Metal Mine,2021(3):1-10.

[82] 张培森,鞠照强,胡昕,等.基于RSM的高浓度膏体充填材料配比优化试验研究[J].矿业研究与开发,2025,45(2):57-65.
Zhang Peisen, Ju Zhaoqiang, Hu Xin, et al. Experimental study on proportion optimization of high-concentration paste filling materials based on RSM[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):57-65.

[83] 王洪江,彭青松,杨莹,等.金属矿尾砂浓密技术研究现状与展望[J].工程科学学报,2022,44(6):971-980.
Wang Hongjiang, Peng Qingsong, Yang Ying, et al. Research status and prospect of thickening technology for metal tailings[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(6):971-980.

[84] 李创起,祝鑫,彭亮,等.某矿山高浓度胶结充填材料试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(5):15-20.
Li Chuangqi, Zhu Xin, Peng Liang, et al. Experimental study on high-concentration cemented filling material in a mine[J]. Mining Research and Development,2022,42(5):15-20.

[85] 祝鑫,彭亮,仵锋锋,等.贵州某金矿超细尾砂充填工艺优选与应用[J].矿业研究与开发,2022,42(9):34-38.
Zhu Xin, Peng Liang, Wu Fengfeng, et al. Preferential selection and application of ultra fine tailings filling process in a gold mine of Guizhou[J]. Mining Research and Development,2022,42(9):34-38.

[86] 彭亮,康瑞海,姚中亮,等.杜达铅锌矿充填骨料粒级组成分析研究[J].矿业研究与开发,2016,36(10):54-58.
Peng Liang, Kang Ruihai, Yao Zhongliang, et al. Analysis and research on particle size composition of filling aggregate in Duddar lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development,2016,36(10):54-58.

[87] 杨宁,尹贤刚,林尧.全尾砂充填性能试验研究[J].有色金属工程,2019,9(5):87-93.
Yang Ning, Yin Xiangang, Lin Yao. Experimental study on filling performance of full tailings[J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(5):87-93.

[88] 皇甫风成,邓代强,康瑞海,等.阿舍勒铜矿充填材料试验研究[J].有色金属(矿山部分),2016,68(2):87-90.
Huangfu Fengcheng, Deng Daiqiang, Kang Ruihai, et al. Experimental study on the filling materials of Ashele copper mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2016,68(2):87-90.

[89] 王志君.李楼铁矿空场嗣后充填法运行管理探讨[J].金属矿山,2022(6):35-39.
Wang Zhijun. Discussion on operation and management of subsequent filling method in Lilou iron mine[J]. Metal Mine,2022(6):35-39.

[90] 彭亮,康瑞海,柳小胜,等.某铅锌矿充填系统工艺选择研究分析[J].矿业研究与开发,2020,40(3):28-32.
Peng Liang, Kang Ruihai, Liu Xiaosheng, et al. Study and analysis on the process selection of filling system in a lead-zinc ore[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3):28-32.

[91] 杨晓炳,闫泽鹏,尹升华,等.基于环管试验的粗骨料膏体管输阻力模型及优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):181-191.
Yang Xiaobing, Yan Zepeng, Yin Shenghua, et al. Transportation pressure model and optimization of coarse aggregate paste backfill based on pipe loop test[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(5):181-191.

[92] 王长军,卢磊芬,冯庆杰,等.三贵口铅锌矿矿柱及采空区稳定性分析研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):49-56.
Wang Changjun, Lu Leifen, Feng Qingjie, et al. Stability analysis of pillar and goaf in Sanguikou lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):49-56.

[93] 王宗勇,李树建,李宏亮,等.基于昆阳磷矿二矿充填材料特性试验研究[J].采矿技术,2023,23(4):180-187.
Wang Zongyong, Li Shujian, Li Hongliang, et al. Experimental study on the characteristics of filling materials based on the second mine of Kunyang phosphate mine[J]. Mining Technology,2023,23(4):180-187.

[94] 王彬,邵宗煌,肖磊,等.超深井充填管道磨损规律及调压减磨技术研究[J].矿业研究与开发,2026,46(6):1-13.
Wang Bin, Shao Zonghuang, Xiao Lei, et al. Research on wear law and pressure regulation and wear reduction technology of filling pipeline in ultra-deep mines[J]. Mining Research and Development,2026,46(6):1-13.

[95] 林卫星,江科,龚永超,等.超细尾砂充填材料流动性与强度的影响因素分析以及配比预测研究[J].矿业研究与开发,2025,45(11):78-87.

Lin Weixin, Jiang Ke, Gong Yongchao, et al. Analysis of influencing factors of fluidity and strength for ultra-fine tailings filling materials and prediction of proportioning[J]. Mining Research and Development,2025,45(11):78-87.

[96] 何国志,刘国磊,马秋峰,等.复合添加剂配比对粉煤灰基矿用充填材料性能的影响研究[J].矿业研究与开发,2025,45(11):88-96.
He Guozhi, Liu Guolei, Ma Qiufeng, et al. Influence of compound additive ratio on the performance of fly ash-based mine filling material[J]. Mining Research and Development, 2025,45(11):88-96.

[97] 彭亮,段胜胜,尹旭岩,等.某铁矿细尾砂充填材料研发与性能试验研究[J].采矿技术,2025,25(3):210-215.
Peng Liang, Duan Shengsheng, Yin Xuyan, et al. Development and performance testing of fine tailing backfill material for an iron mine[J]. Mining Technology,2025,25(3):210-215.

[98] 张耀平,朱训文,雷大星,等.基于正交试验的尾砂废石复合胶结充填体强度研究[J].矿业研究与开发,2025,45(7):93-99.
Zhang Yaoping, Zhu Xunwen, Lei Daxing, et al. Research on strength of tailings waste rock composite cemented backfill based on orthogonal test[J]. Mining Research and Development,2025,45(7):93-99.