深部金属矿规模化低放热高强充填体的成型技术与装备研究现状及发展战略*

康瑞海[1,2],盛佳[1,3,4],姜海强[5],石勇[1,4,6],袁子淇[1,3],姚安华[1,2],周晃[1,6],熊有为[7]

(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.金属矿山安全技术国家重点实验室, 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.东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
6.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
7.长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

摘要:深部矿体开采普遍面临高地应力、高地温、高渗透压与强采动扰动的复杂赋存环境,传统充填开采技术和装备难以满足安全高效开采需求。在深部规模化开采条件下,深井充填面临胶凝材料水化放热量大、充填体成型慢、充填系统能力不足、高势能料浆输送易诱发不满管与水击、爆管风险高等问题,成为制约深部矿山安全高效开采的关键瓶颈。围绕深部金属矿规模化安全高效充填的工程需求,提出了"超细尾砂充填料浆快速持续低热固化机理、深井满管输送压力调控与能量高效利用机制、深部高应力下大高度充填体稳定性控制与成型机理"3项关键问题,系统梳理了低放热早高强充填胶凝材料性能调控、超细尾砂规模化连续稳态浓密、深井充填料浆降势发电与满管输送安全保障、深部高地应力下大高度采场充填体成型与质量保障4项关键技术。明确了千米以深千万吨级金属矿绿色高效充填新材料、新技术、新装备研发方向,构建深部规模化安全高效充填技术体系,以期全面提升我国深部战略性矿产资源绿色高效开发能力,为深部矿产资源规模化开发提供理论基础与技术支撑。

关键词:深部金属矿;规模化开采;充填采矿;低放热高强充填体;充填技术与装备

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0020-16

Research Status and Development Strategy of Forming Technology and Equipment for Low-Heat High-Strength Backfill in Large-Scale Mining of Deep Metal Mines

Kang Ruihai[1,2], *Sheng Jia*[1,3,4], *Jiang Haiqiang*[5], *Shi Yong*[1,4,6], *Yuan Ziqi*[1,3], *Yao Anhua*[1,2], *Zhou Huang*[1,6], *Xiong Youwei*[7]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Technology Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China;
5.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
6.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
7.CINF Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410019, China)

Abstract: Deep orebody mining generally faces a complex occurrence environment characterized by high in-situ stress, high ground temperature, high osmotic pressure, and strong mining disturbance. Conventional backfill mining technologies and equipment struggle to meet the demands of safe and efficient mining. Under large-scale deep mining conditions, deep shafe

* **收稿日期**:2026-06-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907203)

作者简介:康瑞海(1973—),男,内蒙古呼伦贝尔人,正高级工程师,主要从事充填工艺、充填材料、充填设备方面的技术研究与设计工作。E-mail:258805458@qq.com

通信作者:石勇(1996—),男,江西南昌人,硕士,工程师,主要从事矿山绿色充填采矿与固废全量利用技术研究。E-mail:stoney3511_csu@126.com

backfill faces problems such as high hydration heat release of cementitious materials, slow backfill formation, insufficient backfill system capacity, and high-potential-energy slurry transport that easily induces partially filled pipe flow, water hammer, and pipe bursting risks. These issues have become key bottlenecks restricting the safe and efficient mining of deep mines. Focusing on the engineering requirements for large-scale, safe, and efficient backfill in deep metal mines, three key issues were proposed: the rapid and sustained low-heat solidification mechanism of ultrafine tailings backfill slurry, the pressure regulation and high-efficiency energy utilization mechanism of full-pipe transport in deep shafts, and the stability control and formation mechanism of high backfill under deep high in-situ stress. Four key technologies were systematically summarized: performance regulation of low-heat, early-strength, and high-strength backfill cementitious materials; large-scale continuous and steady-state thickening of ultrafine tailings; pressure-reducing power generation and full-pipe transport safety assurance for deep mine backfill slurry; and formation and quality assurance of high backfill under deep high in-situ stress. The research and development directions for new materials, technologies, and equipment for green and efficient backfill in metal mines at depths of over 1 000 m and with capacities of tens of millions of tons were clarified, and a large-scale, safe, and efficient backfill technology system for deep mining was constructed. This aims to comprehensively enhance China's capacity for green and efficient development of deep strategic mineral resources and provide a theoretical basis and technical support for the large-scale development of deep mineral resources.

Key words: Deep metal mine, Large-scale mining, Backfill mining, Low-heat high-strength backfill, Backfill technology and equipment

0 引言

我国铁、铬、铜等大宗战略性金属矿产对外依存度长期超过70%,资源供给安全已成为关乎国民经济稳定运行的重大战略问题[1]。随着浅部矿产资源逐渐枯竭,我国金属矿产开发正加速向深部化、规模化方向转型[2-4]。勘探结果表明,我国2 000 m以深矿产资源储量占比达70%以上,目前,雅鲁藏布江成矿带、辽吉黑成矿带、华北克拉通东南缘、胶东矿集区等区域已探明深部铁、铜矿石资源上百亿吨。加快推进深部矿产资源规模化开发,对保障国家战略性矿产供给、降低对外依存度、破解国际供应链"卡脖子"风险具有重要意义[5]。

国外深部开采起步于20世纪初,目前有110余座矿山开采深度超1 000 m。其中,南非的Mponeng金矿采深超4 000 m,南非TauTona金矿和Savuka金矿、印度Kolar金矿、美国Empire金矿采深均超3 000 m[6]。工程实践表明,深部资源开发面临高地应力、高地温、高渗透压及强扰动的典型特征,普遍存在安全风险高、生产成本高、开采效率低等突出挑战[7-8]。以南非为代表的矿业国家的经验表明,崩落法仅适用于一定深度范围内的厚大矿体;对于埋深2 000～3 000 m及以深的急倾斜、缓倾斜等复杂矿体,膏体充填采矿法被公认为应对深部复杂环境、实现安全绿色高效开采的可靠技术途径[9]。我国自20世纪90年代进入深部开采阶段,目前已有22座矿山的采深超过1 000 m,预计未来10～15 a,我国将有近百座地下金属矿山实现千米以深开采,最大采深可达3 000 m[10]。现阶段,三山岛金矿采深已超过2 000 m,会泽铅锌矿、金川镍矿、思山岭铁矿、花红沟铁矿及冬瓜山铜矿等采深均超过1 000 m,并普遍采用膏体充填采矿法进行开采。

随着开采深度不断增大、生产规模持续提升,传统膏体充填技术的瓶颈日益凸显。一是深井料浆输送难题。在大高差垂直管道输送过程中,高势能料浆加速度大,引发输送不满管、管道磨损严重等问题[11-12]。深井管道长期磨损易诱发泄漏、爆管等事故,严重威胁生产安全并降低充填效率;现有泄压或机械增阻方式仅能耗散重力势能以降低管道压力,尚未实现输送能量的有效回收与利用。二是深井充填材料性能与充填能力不足问题。以传统水泥作为胶结剂的充填材料成本较高,且普遍存在水化放热量大、早期强度低、成型周期长等缺陷;在深部高地温环境下,水泥水化放热易与围岩热环境叠加,加剧井下热害效应,同时影响充填体成型质量,难以满足深部矿山安全开采需求;此外,随着尾砂粒级不断细化,细尾砂占比显著提升,导致浓密效率下降、底流浓度偏低且波动较大,充填连续性差、充填能力不足,难以支撑千万吨级矿山规模化连续稳态充填需求。

面向国家战略需求,我国深部战略性矿产资源亟待以千万吨级规模、低成本、安全环保方式进行开采,为满足深部金属矿规模化、安全高效充填的需求,亟须研发高应力、高地温环境下,规模化低放热高强度充填的新材料、新技术与新装备。

1 国内外深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备研究现状

随着浅部资源枯竭,金属矿产资源开发全面向

深部推进,我国典型深井矿山如图 1 所示。据预测,随着深部探测技术与勘探能力持续提升,我国深井矿山数量有望位居世界前列,并可在 3 000～5 000 m 埋深范围内探明多个大型金属矿床[13]。推进深部金属矿规模化开采,是保障我国战略性矿产资源长期稳定供给、实现矿业可持续发展的重要途径[14]。充填采矿法是应对深部金属矿规模化开采条件下高应力与强开采扰动挑战,实现安全高效开采的关键技术途径之一,但在深部复杂条件与矿山向大型化、集约化方向转型的过程中,充填采矿法面临着一系列亟待解决的技术难题。围绕这些难题,发展适应深部复杂条件的充填技术与装备,是提升充填系统各环节适应性与整体效能,支撑深部资源安全高效开采的重要方向。

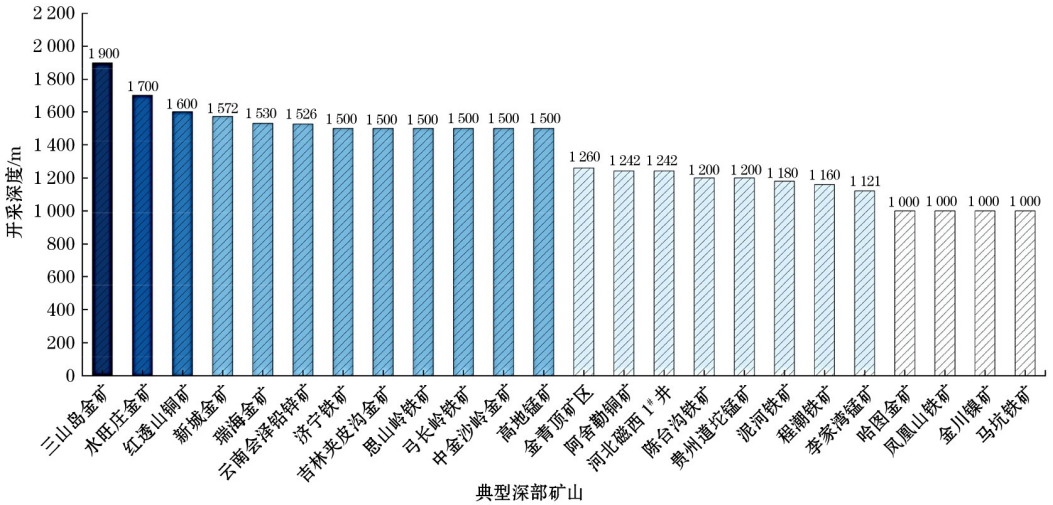


图 1 我国典型深井矿山

Fig.1 Ttypical deep mines in China

1.1 国外研究现状

在深部矿产资源开发成为全球共识的背景下,围绕超深井、高地温、高应力、大采场等极端条件下充填材料研发、尾砂高效浓密、料浆稳定输送、充填体成型等核心难题,国外学者开展了广泛而深入的研究,旨在通过理论创新与工艺革新,提升充填技术对深部复杂工况的适应性,为深部金属矿规模化安全高效开采提供理论与技术支撑。

1.1.1 低放热早高强充填胶结材料

在充填胶结材料方面,为解决水泥基胶凝材料成本高、碳排放量大的问题,研究体系逐步向低碳、高性能材料演进[15],如图 2 所示。

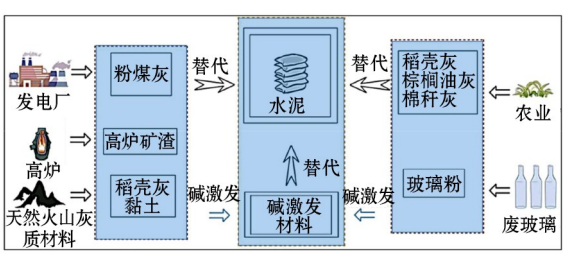


图 2 新型胶凝材料研究体系[15]

Fig.2 Research framework for novel cementitious materials[15]

早期研究以辅助胶凝材料(Supplementary Cementitious Materials,SCMs)的资源化利用为核心,美国垦务局等机构在大坝工程中系统开展了矿渣、粉煤灰等 SCMs 的应用研究,推动了多组分胶结体系的发展[16]。研究表明,SCMs 可通过稀释效应调控胶凝体系水化动力学过程,降低水化放热峰值并延缓放热速率,同时促进后期水化产物结构致密化,实现低放热与后期强度发展的协同优化[17]。在此基础上,以矿渣-石膏体系为代表的硫酸盐水泥(Supersulfated cements, SSCs)等低热胶结材料得以发展。该类材料矿渣比例高,水化放热量低、体积稳定性好,但早期反应速率较慢,强度发展受限,难以满足深部矿山快速成型与早期支撑需求[18]。为进一步提升早期强度,研究逐步拓展至碱激发材料(Alkali-activated materials, AAM)和地聚物(Geopolymer)等新型低碳胶结体系[19]。以 Myers 等[20]、Walkley 等[21]为代表的研究团队围绕胶凝体系水化动力学与微观结构演化开展了系统研究,揭示了钙(铝)硅酸盐水化凝胶(Calcium-(Alumino)-Silicate-Hydrate,C-(A)-S-H)的形成及结构演化规律,阐明了胶凝体系组成对凝胶结构、相组成及微观结构演化的调控作用,为胶凝材料性能优化提供了理论基础。国外研究在降低水化放热、提高水泥替代率及激发固废活性等方面取得了显著进展,但针对深部高温高地应力环境下,充填材料“低成本—低

放热—早高强”协同调控机制的系统研究仍显不足，难以满足深部金属矿山规模化安全充填的工程需求。

1.1.2　尾砂高效浓密技术

随着深部矿体规模化开采，尾砂产出量激增，亟须提升尾砂处理能力以实现其妥善处置与资源化利用。随着理论、技术与装备的创新、开发及推广应用，针对细粒尾砂的脱水处理，传统的分级脱泥技术已逐步被深锥浓密絮凝脱水技术取代[22]。细尾砂浆的自然沉降浓缩效率较低，通过加入高分子絮凝剂，细粒尾砂能够凝聚成更大尺寸、沉降速度更快的絮团[23]，提升脱水效果。面对深井开采超细尾砂规模化浓密的需求，尾砂高效浓密机理研究亟待突破。近年来，国外尾砂浓密研究持续深入，俄罗斯圣彼得堡矿业大学 Romashev 等[24]研发了基于机械视觉技术的自适应方法，该方法能自动识别并追踪尾砂沉降固液分离界面，判定自由沉降转入压缩的临界点，为浓密机的准确设计提供了高可靠性数据；澳大利亚联邦科学与工业研究组织 Fawell 等[25]引入了絮团生长与破碎模型，采用计算机流体动力学(CFD)研究了絮凝剂絮凝过程中剪切力、停留时间、絮团过度破碎对尾砂底流浓度的影响，为高效浓密机设计提供了理论依据；澳大利亚南澳大学 Joseph-Soly 等[26]使用超吸水聚合物聚丙烯酸钠盐对含亲水性钠蒙脱石膨胀黏土的镍红土矿尾砂浆进行浓密处理，证明了超吸水聚合物在亲水性矿物尾砂浆浓密应用中的高效性。在浓密设备方面，丹麦艾法史密斯(FLSmidth)公司、芬兰美卓(Metso)公司处于国际领先地位。FLSmidth 是深锥浓密技术商业化的先驱，其深锥浓密机(见图 3)在高浓度底流需求场景中应用广泛，在武山铜矿处理超细尾砂时，底流质量浓度可达 72%～76%，单位处理能力为 0.68 t/(m^2 · h)[27]。Metso 深锥浓密机(见图 4)在膏体浓密领域积累深厚，其第二代膏体浓密机配备智能提耙装置进行垂直负载监控，在尾砂矿物组成和尾砂浆进料速率变化较大的情况下，也能够实现高效脱水浓密，使底流质量浓度稳定在 66%～68%，其高压缩浓密机处理能力可达 0.35～1.5 t/(m^2 · h)。



图 3　艾法史密斯深锥浓密机

Fig.3　FLSmidth deep cone thickener



图 4　美卓深锥浓密机

Fig.4　Metso deep cone thickener

1.1.3　深井充填料浆稳定输送与管道损伤检测技术

在深井充填料浆输送方面，澳大利亚 Savage River 磁铁矿的料浆输送管道为世界上最早建成的长距离矿浆输送系统之一，已连续运营超过 50 a，该系统通过设置泄压孔板释放超压以维持输送压力稳定[28]。印度尼西亚 Irian Jaya 铜矿针对大高差、长距离输送工况，采用阻流站维持系统背压，实现了料浆满管稳定输送[29]。与此同时，加拿大阿尔伯塔大学等机构围绕长距离料浆输送过程中的管道选材、系统设计、料浆流型演化及阻力特性等方面开展了系统研究[30]，为深井高压输送系统设计提供了理论基础。现有深井输送系统主要依赖泄压、增阻等“耗散型”手段消纳料浆的重力势能，虽能保障压力安全，但大量压力能以节流损失形式被浪费。随着能源高效利用需求提升，国外水利输送领域已引入管道式水轮机等小型液压涡轮装置回收管路剩余压力能[31]，但尚无针对高浓度、高磨蚀性充填料浆的能量回收装置研究，未形成兼顾安全输送、压力调控与能量利用的一体化技术体系。

在管道损伤检测方面，国外已形成较为成熟的管道在线检测(In-Line Inspection，ILI)技术体系，主要包括超声检测、磁漏检测、涡流检测、激光扫描、机器视觉以及分布式光纤传感等方法[32-33]。近年来，研究已由单一检测方法向“机器人＋多传感融合”方向演进。例如，德国 iPEK 公司的内窥检测机器人集成激光扫描、机器视觉等多种传感器，可完成直径 100～2 000 mm 管道的内窥检测，已在市政排水、油气及供水管道检测中成熟应用[34]，如图 5(a)所示；美国 Oceaneering 海洋工程公司的 Magna Scan 海底油气管道检测机器人采用高速超声扫描技术，可实现管道内部点蚀、裂纹等缺陷的 360°检测[35]，如图 5(b)所示；德国 ROSEN Group 公司针对原油管道清管和内壁缺陷检测，基于超声、电磁超声等技术研制了依靠管道内介质压差驱动的被动式检测装置(Pipeline Inspection Gauge，PIG)，该技术已较为成

熟[36],如图 5(c)所示。现有管道检测技术集中于油气输送、排水管道及部分化工管道,可实现管壁减薄程度的检测[37]。然而,充填料浆具有高固相浓度、高磨蚀性、强屈服应力及易沉积等特点,现有检测机器人对膏体充填料浆输送工况的适配性仍有待提升[38]。



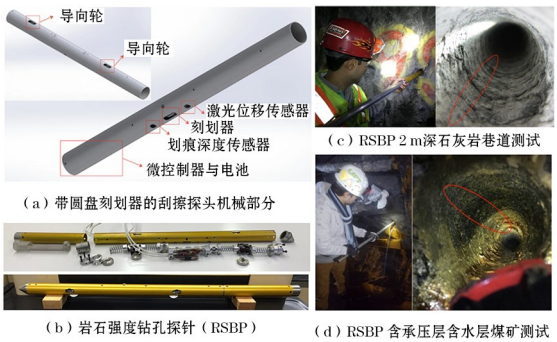
(a) 内窥检测机器人 (b) 油气管道检测机器人 (c) 被动式检测装置

图 5 国外管道机器人[37]

Fig.5 Foreign pipeline robots[37]

1.1.4 采场充填体接顶成型与强度检测技术

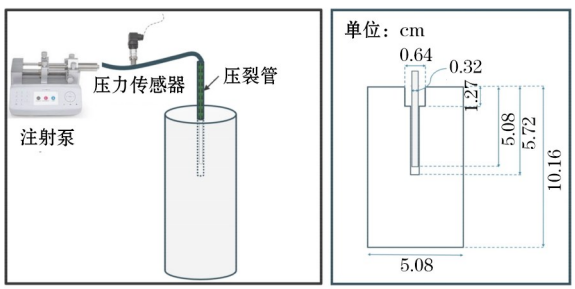
充填接顶率是确保充填承载效果的重要指标之一,确保接顶率达到目标值,实现对顶板进行及时有效的支撑,在保障安全高效采矿中具有重要作用。力学强度是发挥充填体承载作用的关键,采场充填体质量检测是验证其承载能力,保障回采安全不可或缺的环节。在深部金属矿规模化开采条件下,大高度充填体泌水沉缩加剧,高地应力与强开采扰动导致围岩变形加剧、破坏风险陡增,提升充填接顶率和加强充填体质量检测变得更为重要。目前,国外关于充填体接顶的研究鲜有文献记载。在采场充填体质量检测方面,常规手段为钻孔取芯并对取芯试件进行力学强度测试[39-40],存在取样困难、芯样质量要求高、破坏充填体承载结构且耗时长的问题[41]。因此,在最大限度保持承载结构完整、无需取样的前提下,基于声波、机械参数等低侵入方法实现强度快速评估的原位检测技术,正逐渐成为新的研究趋势。国外研究主要集中于油气开发、矿业工程、岩土工程领域,主要以钻井机械参数[42-43]、声波测井数据[44]与实验室岩石试件抗压强度测试数据为基础,探究其关联性。部分学者结合人工智能算法[45]预测岩体强度,伊拉克巴格达大学 Mahdi 等[46]通过连续跟踪钻压、转速、扭矩等钻井参数,建立了人工智能模型,用于预测鲁迈拉油田砂岩地层的抗压强度,模型相关系数达 90%。美国宾夕法尼亚州立大学 Naeimipour 等[47]开发了一种岩石强度钻孔探针(见图 6(a)),该设备于细钻孔内采用微型盘形刀具刮削岩石表面,通过切削力测量估算强度,并在两个大型开挖项目中开展应用,证实其估算值与实验室实测值高度吻合。针对胶结充填体,美国弗吉尼亚理工大学 Frimpong 等[48]提出了一种充填体原位质量检测方法(见图 7),该方法在钻孔中实施水力压裂并测量起裂压力,结合点应力模型进行分析,从而预测充填体的单轴抗拉及抗压强度。回归分析表明,起裂压力与这些强度指标之间存在显著的线性关系。



(a) 带圆盘刻划器的刮擦探头机械部分 (b) 岩石强度钻孔探针(RSBP) (c) RSBP 2 m深石灰岩巷道测试 (d) RSBP 含承压层含水层煤矿测试

图 6 岩石强度钻孔探针及现场实施[47]

Fig.6 Rock strength borehole probe and its field application[47]



(a) 压裂装置 (b) 样品与钻孔尺寸

图 7 水力压裂测量岩石起裂压力[48]

Fig.7 Measurement of rock initiation pressure by hydraulic fracturing[48]

1.2 国内研究现状

随着金属矿开采不断向深部推进,膏体充填采矿法在控制地压、保障安全及实现绿色开采中的作用日益凸显。“十二五”规划以来,针对深部金属矿规模化开采面临的关键技术难题,国内围绕充填材料性能调控、料浆浓密制备、深井管道输送、充填体成型与稳定性控制等方面开展了系统研究,为深部充填技术的发展奠定了良好的基础。

1.2.1 低放热早高强充填胶结材料

在胶结充填材料方面,国内围绕固废资源化利用[49]、复合胶结体系构建[50]及充填体强度调控[51]开展了系统研究,形成了以水泥为主、矿渣与粉煤灰等工业固废协同利用的多元胶结材料体系,在降低

材料成本方面取得了显著进展。相关成果已在李楼铁矿、黄沙坪铅锌矿、锡矿山、永平铜矿、德安天宝铅锌锑矿、内蒙古陈旗天宝铁锌矿等浅部矿山推广应用。马坑铁矿率先建成 45 万 t/a 的低成本胶固粉生产线，每年可降低充填成本约 8 583 万元，为突破千米深部开采提供了技术储备；李楼铁矿通过建设 40 万 t/a 的低成本胶固粉生产线，每年可节约充填成本约 2 784 万元[52]。随着深部矿山大规模建设进程加快，低成本胶结充填技术的工程需求进一步提升。据预测，未来十年我国将有数百座地下金属矿山进入深部开采。思山岭铁矿已建成 1 500 m 超深竖井，计划于 2030 年建成年产 1 500 万 t 的超深井超大规模矿山，结合低成本胶结充填技术，预计年均节约成本超过 4 000 万元，经济效益显著[53]。

金川镍矿是我国最大的分层胶结充填矿山，具有埋藏深、地应力高的特点[54]。针对深部矿山充填成本控制及充填体早高强需求，该矿开展了多种类型固废基充填胶凝材料研发[55]，研发技术路径如图 8 所示。总体而言，现有研究主要侧重于低成本胶凝材料开发，在降低充填成本方面已取得较大进展；但对深部高温高应力环境下充填材料低放热、早高强及其协同调控机制的研究仍相对不足，难以满足深部金属矿规模化安全充填的工程需求。

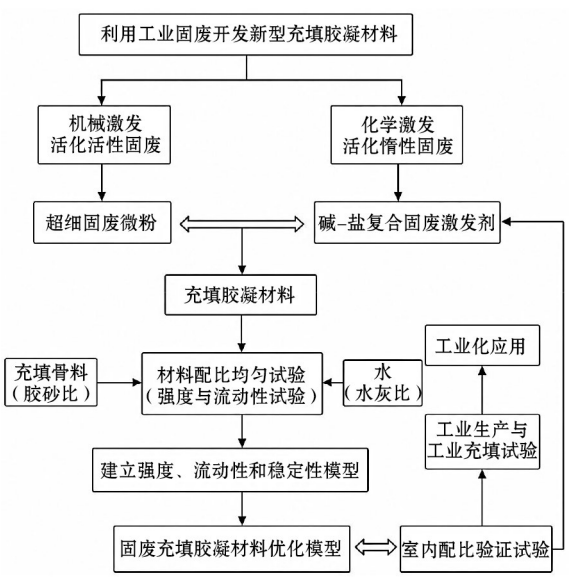


图 8　新型充填胶凝材料研发技术路径[55]

Fig.8　Technical pathway for the research and development of novel backfill cementitious materials[55]

1.2.2　尾砂高效浓密技术

关于尾砂高效浓密，国内研究主要聚焦于絮凝沉降微观机理揭示、多种物理化学增效技术研发以及底流浓度稳定性预测等方向。刘明杰等[56]发现充填料浆通过机械振动后，可使尾砂底流质量浓度平均提高 7.74%，但溢流含固量平均增大了10.11%；王洪江等[57]研究发现在初次絮体形成、絮体剪切破坏与二次絮体形成过程中使用双重絮凝工艺，并采用不同絮凝机制促进细颗粒捕获和大絮体形成，可显著提升尾砂沉降速度与底流浓度；周茜等[58]研究表明，浓密增效剂的使用会破坏絮凝结构，释放絮团间的水分，从而提高尾砂浓度。长沙矿山研究院有限责任公司在尾砂高效浓密方面开展了丰富的研究，研发了国内第一套浓密机与砂仓集中布置且相互调节的胶结充填系统[59]（见图 9），避免了单一砂仓浓缩脱水时沉砂效率低、细粒级尾砂流失的问题。Shi 等[60]揭示了超声波通过提高尾砂颗粒疏水性、降低 Zeta 电位、减小悬浮液黏度，从而促进更大更致密絮团生成的尾砂浓密作用机理；袁子淇等[61]建立了基于 PSO-SVM 的尾砂仓储浓密机放砂稳定性预测模型，其相对误差可低至 1.36%。长沙矿山研究院有限责任公司在尾砂浓密和矿山充填领域处于先进水平，研发了一系列高效、可靠的尾砂浓密设备。该公司的尾砂浓密技术发展经历了从砂仓浓密、深锥浓密、深锥浓密机＋砂仓技术到膏体仓储浓密的迭代，膏体仓储浓密机（见图 10）处理能力为 1.0～1.4 t/(m^2 · h)，适用于全粒径尾矿，具有占地少、投资小的特点，同时具备仓储功能，可长时间连续稳定产出质量浓度为 66%～72%且波动小于 1%的底流，能耗降幅可达 30%以上。目前该设备在中国黄金集团二道沟金矿、中国五矿远景钨矿、天宝集团陈旗天宝铁矿等矿山实现成功应用。但膏体仓储浓密机泥层仍存在局部板结、清仓困难的问题。因此，实现尾砂规模化连续浓密仍是深井规模化开采亟待攻克的难题。



图 9　浓密机与砂仓集中布置的充填站[59]

Fig.9　Backfill plant with centralized layout of thickener and sand bins[59]



图 10 长沙矿山院有限责任公司膏体仓储浓密机

Fig.10 Paste storage thickener of Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd

1.2.3 深井充填料浆稳定输送与管道损伤检测技术

在深井充填料浆管道输送研究方面,我国依托“十三五”国家重点研发计划“深部金属矿绿色开采关键技术研发与示范”等重大项目,在料浆改性调压输送理论上取得重要进展[62-63],并围绕高浓度料浆长距离输送[64]、料浆流动特性[65-66]及压力损失规律[67]开展了系统理论研究。针对深井大高差垂直输送工况,国内逐步形成了以“管路优化—分段减压—局部增阻”为核心的压力调控技术体系,如图 11 所示。具体而言,郑伯坤等[68]通过优化管道布置实现输送压力分布调控;徐东升[69]通过设置减压池、压力消耗器等实现压力分级释放;杨超等[70]、刘行等[71]通过布置节流孔板、螺旋扰流结构等增阻元件,以增强局部阻力,调节输送压力。现有技术主要依赖“消能”手段保障压力平稳与系统安全,而对“用能”层面的重力势能回收与转化机制关注不足[72]。深井大高差输送产生的巨大势能若有效转化为电能,并用于补充高地热环境下矿井通风、制冷等系统的能源需求,可将深井高压输送由技术难点转化为节能优势,从而显著降低矿山生产能耗与运行成本。因此,亟须从能量利用角度出发,深入开展深井大高差条件下料浆输送过程的压力调控与能量利用机制研究。

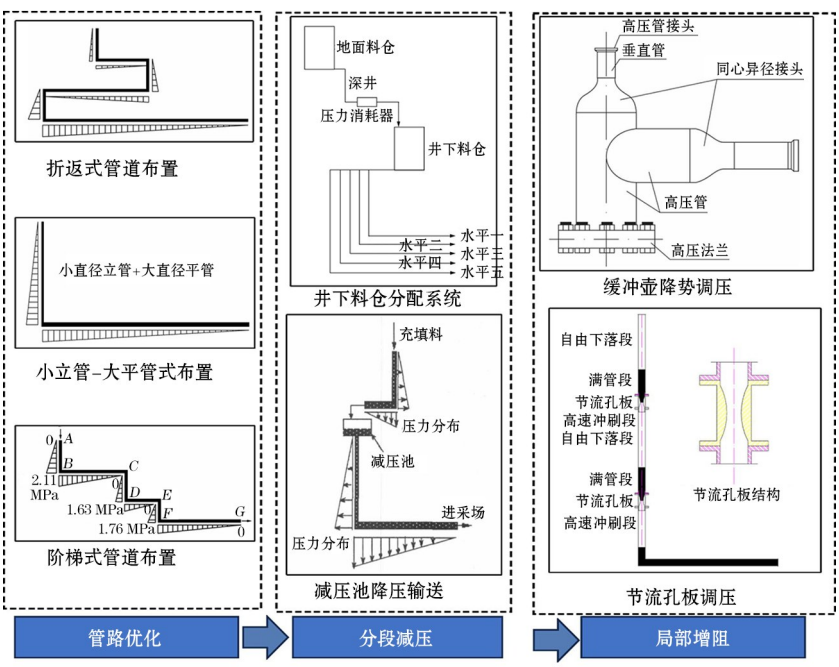


图 11 深部充填料浆减压技术体系[68-71]

Fig.11 Pressure reduction technology system for deep backfill slurry[68-71]

此外,管道磨损是深井大高差输送的另一关键挑战。现有研究主要通过料浆改性[73-74]、输送参数调控实现减磨增效[75];或结合数值模拟揭示磨损机制,并通过优化管道结构(见图 12)[76-77]与管材选型提升耐磨性[78],从而降低管道爆管与泄漏风险[79]。然而,深井管道埋深大、检修困难,事故位置难以快速精确定位,亟须开发主动监测与安全巡检技术。目前,国内管道检测机器人按运动方式与机械结构可分为 7 类[80],如图 13 所示。其中,被动驱动式清管器装置已在长距离油气管道检测中广泛应用[81],但因结构复杂,在续航能力、运动可靠性及复杂工况适用性方面仍存在较大挑战,无法完全满足深井长距离充填输送管道的检测需求。深井膏体充填输送兼具大高差、长距离的特点,高温环境及高浓度、高

磨蚀性料浆的复杂流变行为，对传感器抗干扰能力、密封结构可靠性以及运动机构耐磨性能提出了更高要求。因此，研制适用于深井大高差、长距离输送工况的管道磨损探测与安全巡检装置，实现输送系统的主动化、实时化检测是当前亟待突破的重要技术方向[82]。

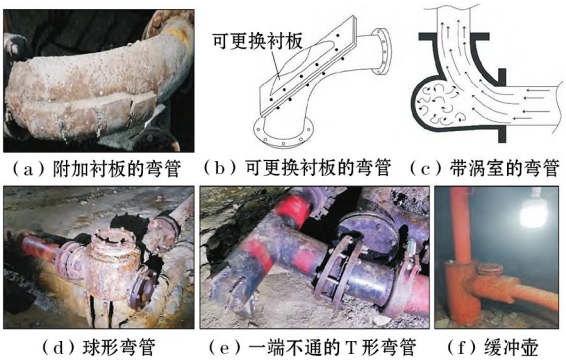


图 12　耐磨弯管结构

Fig.12　Wear-resistant elbow structure



图 13　深部充填料浆减压技术体系[80]

Fig.13　Deep backfill slurry depressurization technology system[80]

1.2.4　采场充填体接顶成型与强度检测技术

提高接顶率的主要技术方法包括料浆加压[83]，研发膨胀性充填材料[84]，调整下料口的位置[85]、数量[86]与下料次数[87]，调整自流坡度[88]等。现有研究还系统探讨了料浆质量浓度、流动阻力、流平性、沉缩性、滤水能力及顶板形状等因素对充填接顶效果的影响[89-91]。针对窄长形下向进路采场，提出采用浮箱式点柱接顶技术[92]（见图 14），其浮箱在高黏度料浆中浮起并局部凸出，能对顶板形成有效支撑，试验采场测得顶板对充填体浮箱的压力约为 0.65 MPa。袋式多点下料贯通充填接顶技术（见图 15）则是借助围堰式袋装充填，采取多点顺序下料充填、贯通式充填、最高点下料充填等技术措施，并添加充填用膨胀剂（掺量 0.1%时，可实现 4.97%的膨胀率），将接顶率由原来的 40%～50%提高至 80%～90%，实现了主动接顶[93]。

研发膨胀性充填材料是提高充填接顶率的重要技术方向，现有研究聚焦于膨胀剂添加量[94]、灰砂比与料浆质量浓度[95]对充填材料膨胀率的影响，充填材料膨胀率随时间的演化规律[96]、添加膨胀剂对充填体力学性能的劣化机理等[97]。通过调控膨胀剂与发泡液掺量制备膨胀充填体，充填体在膨胀过程表现两阶段特征：0～0.5 h 为快速液相膨胀阶段，0.5～24 h 为缓慢固相膨胀阶段，膨胀率为 20%～90%，膨胀剂后期结晶膨胀有助于细化发泡剂初期生成的气泡，提高充填材料致密性，从而缓解充填体强度劣化[98]。

目前，关于充填接顶的方法多样。但规模化开采存在采场空间尺寸大、顶板暴露面积广、料浆流动路径长等特点，导致充填体体积收缩量剧增、顶板形态不规则，造成料浆无法完全贴合顶板、自然堆积角影响显著等问题，现有接顶方法难以适应。长沙矿山研究院有限责任公司研发的高密剂可以在维持料浆良好流动性的前提下，提高料浆质量浓度，有效抑制料浆离析与泌水，有利于提高充填接顶率。发展高浓度、高强度和低收缩性的充填材料，对维系深部大高度充填体的顺利成型、充分接顶与稳定支撑具有重要意义。

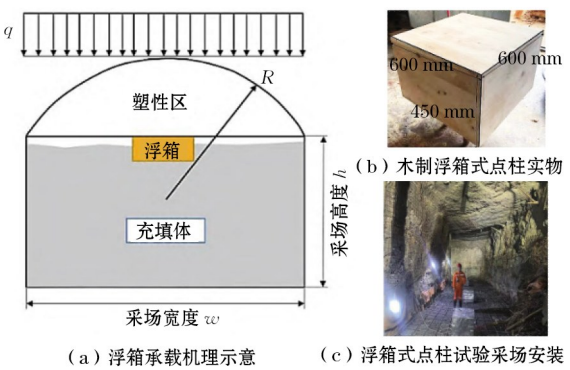


图 14　箱式点柱充填接顶技术[92]

Fig.14　Floating-box point-pillar technology for roof-contact backfilling[92]

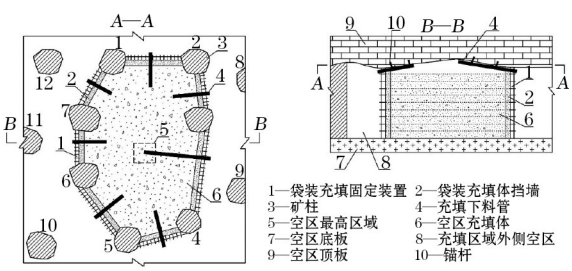


图 15　袋式多点下料贯通充填接顶技术[93]

Fig.15　Bag-type multi-point discharging technology for through-connected roof-contact backfilling[93]

在采场充填体质量检测方面,国内研究集中于使用超声波[99-100],导波[101]、图像分析[102]等技术,通过分析不同胶凝材料掺量、灰砂比、料浆质量浓度、充填料浆养护温度和时间等条件下,充填体强度与超声波声学参数、导波声学参数或图像数据的关联,并借助人工智能算法、拟合函数建立关系模型,利用模型对采场原位充填体抗压强度进行预测估算。Na 等[103]创新性引入了高光谱成像技术,对不同质量浓度(61%~73%)和养护龄期(3~28 d)的充填体试件开展测试,同步获取其抗压强度及对应的高光谱数据,并采用 PSO-SVM-Bagging 算法研究不同光谱预处理方法与特征提取算法对充填体强度预测精度的影响,结果表明,经二阶导数-Savitzky-Golay 平滑-标准化预处理结合无信息变量消除法构建的模型表现最佳,其预测集决定系数 $R_p^2=0.948\ 7$,相对分析误差 $RPD=4.413\ 2$,研究结果可为地下采矿中充填体性能的实时监测、现场反馈与智能调控提供实用化技术路径。超声波脉冲速度(UPV)和电阻率(ER)无损检测技术用于预测胶结膏体充填体无侧限抗压强度(UCS)时(见图16),二者与 UCS 具有高相关性,R^2 值分别为 0.895 和0.896,ER 因对环境因素敏感而变异性较大,UPV、AE 与 ER 混合模型可显著提高强度预测的准确性[104]。

采空区内充填料浆颗粒级配和矿物成分的空间分布不同[105],且充填料浆离析、沉缩和固结硬化过程[106]也有所不同,导致充填体质量分布不均[107],在大规模采场中此效应更为显著,现有检测技术多基于实验室标准试件建立预测模型,尚未充分考虑实际采场环境与充填体非均匀性的复杂影响,整体研究目前仍处于探索阶段,技术体系有待进一步发展与完善,其现场适用性与工程可靠性有待后续研究验证。

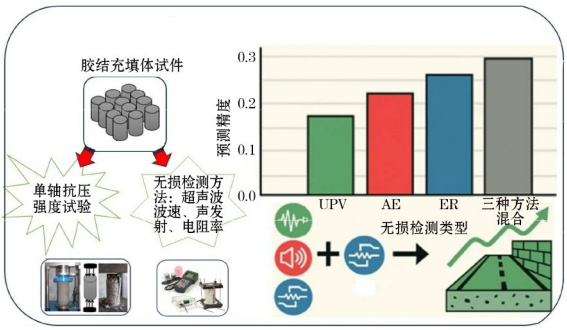


图 16 基于超声波脉冲速度的充填体强度预测估算[104]

Fig.16 Prediction and estimation of backfill strength based on ultrasonic pulse velocity[104]

2 深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备存在的问题、关键技术与应对策略

针对千万吨级深部金属矿规模化安全高效充填面临的"胶凝材料性能难以适配深部环境、料浆制备能力难以满足规模化需求、深井输送系统能量利用效率低"等难题,凝练了三项关键问题,提出了四项关键技术,为突破制约深部超大规模金属矿安全高效充填的瓶颈、构建深部金属矿规模化安全高效连续开采技术体系奠定了重要基础,进而有力支撑了我国战略性金属矿产资源深部规模化安全高效开发。深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备的技术路线如图 17 所示。深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备存在的三个关键问题分别是:超细尾砂充填料浆快速持续低热固化机理、深井满管输送压力调控与能量高效利用机制、深部高应力下大高度采场充填体稳定性与成型机理。提出的具体关键技术及应对策略如下。

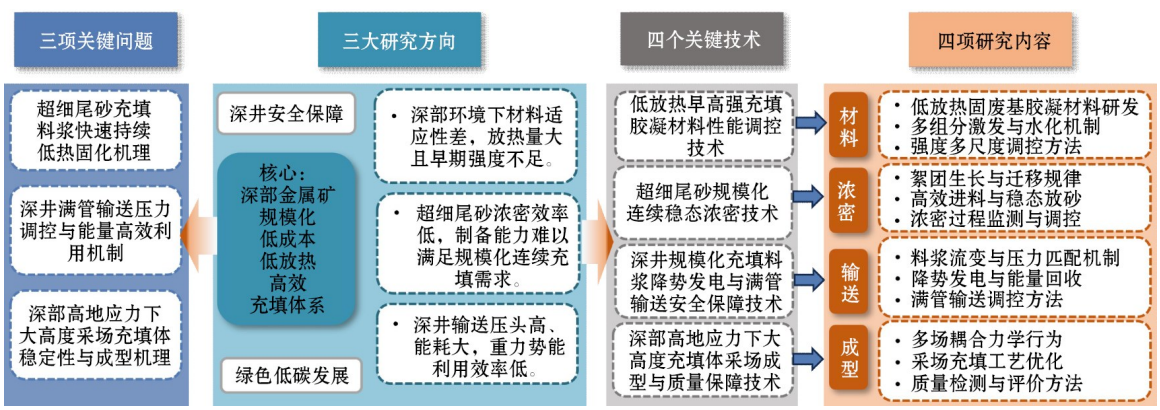


图 17 深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备的技术路线

Fig.17 Technology pathway for large-scale, safe and efficient backfilling technology and equipment in deep metal mines

（1）低放热早高强充填胶凝材料性能调控技术。研发低放热早高强固废基充填胶凝材料；揭示多元复合激发剂协同激发固废机制；建立“源头－内部－外部”充填体强度三维调控体系。

（2）超细尾砂规模化连续稳态浓密技术。揭示超细尾砂絮团生长与迁移规律；研发高效浓密与稳态放砂技术；研究规模化连续充填稳定性控制技术。

（3）深井规模化充填料浆降势发电与满管输送安全保障技术。研究超细尾砂充填料浆流变特性，分析发电降势装置与充填管路压力匹配性，以降势发电方式回收料浆重力势能，基于深井充填管路压力与流量监测反馈调节发电负载，改变发电装置对管流的阻滞调节作用，进而调控管流流速与管路压力分布，抑制不满管流及其诱发的水击与管壁磨损，实现势能回收发电与料浆满管安全输送的协同，研发适用于深井规模化充填料浆降势发电装置及深井充填管路增阻减压满管输送技术。

（4）深部高地应力下大高度充填体采场成型与质量保障技术。研究强爆动载作用下深部大高度充填体力学响应行为、研发深部高应力环境下大高度充填体采场高质量成型工艺技术，构建深部大高度充填体原－异位快速综合检测与质量评价体系。

3　深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备发展战略

3.1　发展战略的相互关系

关键技术侧重于突破深部规模化充填过程中各关键环节的技术瓶颈，是实现工程应用的核心支撑；发展战略则从系统层面出发，面向深井规模化开采需求，对关键技术进行集成与提升，形成安全、高效、低能耗的充填技术体系。二者相互支撑、层层递进，共同服务于深部矿山规模化安全高效开采目标。

围绕“揭示超细尾砂充填料浆低放热固化与强度形成机理、研发深井规模化充填关键技术与装备、实现深部矿山充填系统安全高效运行”的项目目标，具体设置了 4 个发展战略，发展战略之间的逻辑关系如图 18 所示。

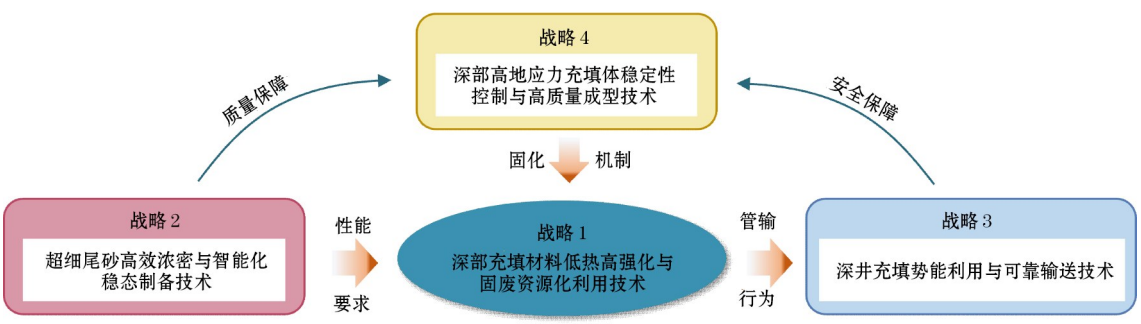


图 18　深部金属矿规模化安全高效充填技术与装备发展战略的关系

Fig.18　Relationship of development strategy for large-scale, safe and efficient backfilling technology and equipment in deep metal mines

3.2　发展战略的具体内容

3.2.1　深部充填材料低热高强化与固废资源化利用技术

针对深井充填体水化放热量大、强度发展慢及成本高等问题，需构建低放热早高强充填材料体系；突破固废高效激发与多尺度性能调控技术；建立充填体强度形成机理与调控理论，实现充填材料低碳化与高性能发展。

3.2.2　超细尾砂高效浓密与智能化稳态制备技术

针对超细尾砂浓密效率低与稳定性差等问题，需发展规模化连续浓密新理论；突破絮团结构调控与稳态放砂技术；构建全流程监测－反馈－优化控制体系，实现充填料浆高质量稳定制备。

3.2.3　深井充填势能利用与可靠输送技术

针对深井输送不满管、压头大、磨损严重问题，需突破料浆势能利用与压力调控机制；研发降势发电与协同减压装备；发展管道磨损探测与安全巡检装备；构建低能耗、高可靠、安全稳定输送技术体系。

3.2.4　深部高地应力充填体稳定性控制与高质量成型技术

面向深部高应力复杂环境，需建立充填体多场耦合理论；突破大高度充填体稳定性控制与成型关键技术；形成全过程质量控制与评价体系，保障充填开采安全。

4　结语

深部金属矿规模化安全高效充填，是面向千米

以深千万吨级开采条件的重要技术支撑,是保障深部矿产资源绿色开发与安全开采的关键基础,也是提升我国战略性矿产资源供应保障能力的重要途径。

为有力支撑我国深部矿产资源高效开发与绿色利用,立足深部高地应力、高地温及复杂开采环境条件,围绕规模化充填过程中材料性能不适配、制备能力不足及输送能耗高等关键问题,系统开展深部金属矿规模化低放热高强充填体成型技术与装备研究。通过凝练关键科学问题,集成低放热早高强充填材料、超细尾砂规模化连续制备、深井料浆降势发电与满管输送以及高地应力充填体成型与质量保障等关键技术,构建适应深部复杂环境的规模化充填技术体系。

目前本研究针对尾砂特性,研发了新型矿渣基充填胶凝材料,其制备的低放热早高强充填体 28 d 抗压强度较 425 普通硅酸盐水泥充填体提高 75%,且充填成本降低 31.7%,水化放热量降低 19%。面向未来,应持续加强关键核心技术攻关与系统集成创新,推动低放热充填材料性能优化、规模化连续稳态制备能力提升及深井低能耗输送技术发展,突破高应力条件下充填体稳定性与成型控制关键难题,形成可工程化应用的成套技术与装备,并开展示范工程建设。通过技术创新与工程实践相结合,全面提升我国深部金属矿规模化充填技术水平,为深部战略性矿产资源的安全、绿色与高效开发提供坚实支撑。

参考文献(References):

[1] 安海忠,李华姣.战略性矿产资源全产业链理论和研究前沿[J].资源与产业,2022,24(1):8-14.
An Haizhong, Li Huajiao. Theory and research advances in whole industrial chain of strategic mineral resources[J]. Resources & Industries, 2022,24(1):8-14.

[2] 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.

[3] 崔祖霞.我国战略性矿产资源保供形势分析与思考[J].中国矿业,2023,32(7):10-14.
Cui Zuxia. Analysis and reflection on the situation of strategic mineral resources conservation in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(7):10-14.

[4] 李鹏,刘岩,汤辰昱,等.中国高科技矿产资源供应安全现状与保障路径[J].工程科学学报,2026,48(4):697-719.
Li Peng, Liu Yan, Tang Chenyu, et al. Current status and safeguarding pathways of supply security for high-tech mineral resources in China[J]. Chinese Journal of Engineering,2026,48(4):697-719.

[5] 赵子欧,乔东海,赵元艺.西藏多龙矿集区荣那铜金矿床蚀变矿物学和地球化学及找矿意义[J].岩石学报,2020,36(9):2785-2798.
Zhao Ziou, Qiao Donghai, Zhao Yuanyi. Alteration mineralogy and geochemistry of the Rongna Cu-Au deposit in the Duolong ore district of Xizang and their deep prospecting significances[J]. Acta Petrologica Sinica,2020,36(9):2785-2798.

[6] Farhadonbeh Shirani Roohollah, Shah Mohammad Imtiaz, Bahadori Moein, et al. Toward sustainable mining:exploring alternative mineral resources and innovative extraction techniques[J]. Mining,2025,5(4):66.

[7] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
Li Xibing, Zhou Jian, Wang Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6):1236-1262.

[8] 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.

[9] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1652-1666.
Wu Aixiang, Zhang Jinjun, Wang Yiming, et al. Cemented paste backfill:transformative technology for green mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(5):1652-1666.

[10] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
Wang Yong, Wu Aixiang, Yang Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8):1281-1292.

[11] 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.

[12] 徐宇,李孜军,贾敏涛,等.深部矿井热害治理协同地热能开采构想及方法分析[J].中国有色金属学报,2022,32(5):1515-1527.

Xu Yu, Li Zijun, Jia Mintao, et al. Conceptualization and method for synergetic mining of geothermal energy as solution to heat hazard control in deep mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1515-1527.

[13] Cai Meifeng, Li Peng, Tan Wenhui, et al. Key engineering technologies to achieve green, intelligent, and sustainable development of deep metal mines in China[J]. Engineering, 2021,7(11):1513-1517.

[14] Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[15] Song Qifeng, Guo Mingzhi, Ling Tungchai. A review of elevated-temperature properties of alternative binders: Supplementary cementitious materials and alkali-activated materials[J]. Construction and Building Materials, 2022, 341:127894.

[16] Xue Yang, Wang Jie, Wang Yanlong, et al. Utilization of industrial solid waste as binders in cemented paste backfill (CPB): mechanisms, challenges, and prospects[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 202(Part A):107720.

[17] Wu Meng, Sui Shiyu, Zhang Yunsheng, et al. Analyzing the filler and activity effect of fly ash and slag on the early hydration of blended cement based on calorimetric test[J]. Construction and Building Materials,2021,276:122201.

[18] Behera S K, Ghosh C N, Mishra D P, et al. Strength development and microstructural investigation of lead-zinc mill tailings based paste backfill with fly ash as alternative binder[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 109:103553.

[19] Fan Fenghong, Liu Zhen, Xu Guoji, et al. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers[J]. Construction and Building Materials,2018,160:66-81.

[20] Myers Rupert J, Bernal Susan A, Gehman John D, et al. The role of Al in cross - linking of alkali - activated slag cements[J]. Journal of the American Ceramic Society,2015, 98(3):996-1004.

[21] Walkley B, Provis J L, San Nicolas R, et al. Stoichiometrically controlled C-(A)-S-H/N-A-S-H gel blends via alkali-activation of synthetic precursors[J]. Advances in Applied Ceramics,2015,114(7):372-377.

[22] 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.

[23] 李宗楠,郭利杰,许文远,等.极细粒级尾砂絮凝沉降规律试验研究[J].中国矿业,2014,23(增刊2):215-218.
Li Zongnan, Guo Lijie, Xu Wenyuan, et al. Experimental study on flocculation sedimentation of fine tailings[J]. China Mining Magazine,2014,23(Suppl.2):215-218.

[24] Romashev Artem O, Nikolaeva Nadezhda V, Gatiatullin Bulat L, et al. Adaptive approach formation using machine vision technology to determine the parameters of enrichment products deposition[J]. Journal of Mining Institute, 2022, 256:677-685.

[25] Fawell P, Nguyen T, Solnordal C B, et al. Enhancing gravity thickener feedwell design and operation for optimal flocculation through the application of computational fluid dynamics[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2021,42(7):496-510.

[26] Joseph-Soly Sophia, Saldanha Trevor, Nosrati Ataollah, et al. Improved dewatering of clay rich mineral dispersions using recyclable superabsorbent polymers[J]. Chemical Engineering Research & Design,2019,142:78-86.

[27] 刘超美,王先敏,张水华.FLSmidth深锥浓密机在膏体充填中的应用[J].冶金与材料,2021,41(6):31-32.
Liu Chaomei, Wang Xianmin, Zhang Shuihua. Application of FLSmidth deep cone thickener in paste backfill[J]. Metallurgy and Materials,2021,41(6):31-32.

[28] Reddy N V K, Pothal J K, Barik R, et al. Pipeline slurry transportation system: an overview[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,2023,14(3):03123001.

[29] Cowper N T Snr, Cowper N T Jnr, Thomas A D. Slurry pipelines: past, present and future[J]. Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering,2009,7(2):189-196.

[30] Joshi Tanuj, Parkash Om, Krishan Gopal. Numerical investigation of slurry pressure drop at different pipe roughness in a straight pipe using CFD[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2022,47(12):15391-15414.

[31] Itani Youssef, Soliman Mohamed Reda, Kahil Maher. Recovering energy by hydro-turbines application in water transmission pipelines: a case study west of Saudi Arabia[J]. Energy,2020,211:118613.

[32] Jan Hamad, Sulaiman Muhammad, Khan Naveed Ahmad, et al. Improved pipeline damage detection using flexural and torsional ultrasonic guided waves[J]. Research in Mathematics,2026,13(1):2648988.

[33] Wen Chengcheng, Hu Shaowei, Wang Juan, et al. Fiber optic sensing technology in underground pipeline health monitoring: a comprehensive review[J]. Structural Health Monitoring,2026,25(1):630-658.

[34] Ciszewski Michał, Giergiel Mariusz, Buratowski Tomasz, et al. Robotic inspection of pipelines[M]//Modeling and Control of a Tracked Mobile Robot for Pipeline Inspection. Cham: Springer International Publishing,2020:5-21.

[35] Zhang Yulong, Zheng Miaozi, An Chen, et al. A review of the integrity management of subsea production systems: inspection and monitoring methods[J]. Ships and offshore Structures,2019,14(8):789-803.

[36] Mishra Devesh, Agrawal Krishna Kant, Abbas Ali, et al. PIG[Pipe Inspection Gauge]:an artificial dustman for cross country pipelines[J]. Procedia Computer Science,2019,152:333-340.

[37] Ogai Harutoshi, Bhattacharya Bishakh. Pipe inspection robots for structural health and condition monitoring[M]. New Delhi, India: Springer,2018.

[38] Ma Qingmiao, Liang Weige, Zhou Peiyi. A review on pipeline in-line inspection technologies[J]. Sensors,2025,25(15):4873.

[39] 王忠彪,王世进,吴乾坤,等.高水材料充填体强度检测与分析[J].能源与环保,2017,39(6):111-116.
Wang Zhongbiao, Wang Shijin, Wu Qiankun, et al. Strength test and analysis on high-water material backfill [J]. China Energy and Environmental Protection,2017,39(6):111-116.

[40] Zhang Xinguo, Zhang Shichuan. Experimental investigation on mechanical properties of in situ cemented paste backfill containing coal gangue and fly ash[J]. Advances in Civil Engineering,2020,2020:1-12.

[41] Chen Fengbin, Liu Jiguang, Zhang Xiaowei, et al. Review on the art of roof contacting in cemented waste backfill technology in a metal mine[J]. Minerals,2022,12(6):721.

[42] Gowida Ahmed, Elkatatny Salaheldin, Gamal Hany. Unconfined compressive strength (UCS) prediction in real-time while drilling using artificial intelligence tools [J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33 (13): 8043-8054.

[43] Lakshminarayana C R, Tripathi Anup Kumar, Pal Samir Kumar. Experimental investigation on potential use of drilling parameters to quantify rock strength [J]. International Journal of Geo-Engineering,2021,12(1):1-15.

[44] Musolino Matthew, Holford Simon, King Rosalind, et al. Evaluating uncertainty in empirically derived unconfined compressive strength (UCS) estimates and implications for drilling applications; a case study from the Cooper Basin[J]. Exploration Geophysics,2023,54(5):1-16.

[45] Xiang Zizhuo, Yu Zexin, Kang Wonhee, et al. Estimation of in-situ rock strength from borehole geophysical logs in Australian coal mine sites[J]. International Journal of Coal Geology,2023,269:104210.

[46] Mahdi Doaa S, Alrazzaq Ayad A. Estimation of the unconfined compressive strength from drilling data using artificial neural network in the Rumaila Oil Field, Southern Iraq[J]. The Iraqi Geological Journal, 2025, 58 (1A): 130-139.

[47] Naeimipour A, Rostami J. Estimation of rock in-situ strength using Rock Strength Borehole Probe (RSBP)[C]// Proceedings of the 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Alexandria: ARMA,2017.

[48] Frimpong James A, Shabab Basel Ahmad, Pandey Rohit, et al. Fracture initiation pressure as a measure of cemented paste backfill strength [J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2025,42(3):1305-1323.

[49] 侯正猛,张盛友,陈前均,等."蓝色矿山"全生命周期管理实践综述:以可持续发展和资源高效利用为核心[J].煤田地质与勘探,2026,54(5):61-82.
Hou Zhengmeng, Zhang Shengyou, Chen Qianjun, et al. A review of full-lifecycle management practices for blue mining centered on sustainable development and resource-efficient utilization[J]. Coal Geology & Exploration,2026,54(5):61-82.

[50] 朱庚杰,朱万成,齐兆军,等.固废基充填胶凝材料配比分步优化及其水化胶结机理[J].工程科学学报,2023,45(8):1304-1315.
Zhu Gengjie, Zhu Wancheng, Qi Zhaojun, et al. Stepwise optimization of mix proportion and hydration-cementation mechanism of solid waste-based filling cementitious materials[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(8):1304-1315.

[51] 彭跃金.多角度协同分析优化分段空场嗣后充填体强度[J].中国矿山工程,2026,55(1):66-73.
Peng Yuejin. Multi-angle collaborative analysis to optimize the strength of sublevel open stoping subsequent filling body [J].China Mine Engineering,2026,55(1):66-73.

[52] 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.

[53] 李真,闫广亮,宋建村,等.思山岭铁矿超深超大规模开采工艺与思考[J].矿业研究与开发,2023,43(8):1-6.
Li Zhen, Yan Guangliang, Song Jiancun, et al. Study and consideration on mining method of ultra deep and ultra large-scale in Sishanling Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(8):1-6.

[54] 杨志强,陈得信,高谦,等.金川充填胶凝材料研究进展与废弃物综合利用展望[J].福州大学学报(自然科学版),2017,45(4):610-616.
Yang Zhiqiang, Chen Dexin, Gao Qian, et al. Research advance on filling cementing material and prospect for comprehensive utilization of waste in Jinchuan mine [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition),2017,45(4):610-616.

[55] 肖柏林,王建栋,阮竹恩,等.金属矿绿色高效膏体充填胶凝材料研究与应用进展[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):1-13.
Xiao Bolin, Wang Jiandong, Ruan Zhuen, et al. Research and application development of the green and efficient paste-fill cementitious materials[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(5):1-13.

[56] 刘明杰,赖伟,高峰,等.机械振动在尾砂浓密与放砂中的协同作用及试验研究[J].矿业研究与开发,2026,46(1):126-132.
Liu Mingjie, Lai Wei, Gao Feng, et al. Synergistic effect and experimental study of mechanical vibration on tailings thickening and sand discharge[J]. Mining Research and Development,2026,46(1):126-132.

[57] 王洪江,杨亚楠,郭佳宾.基于双重絮凝的超细尾砂浓密脱水性能及絮凝机制[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3597-3608.
Wang Hongjiang, Yang Ya'nan, Guo Jiabin. Thickening dehydration performance and flocculation mechanism of ultrafine tailings based on dual flocculation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(9):3597-3608.

[58] 周茜,刘娟红,吴爱祥,等.浓密增效剂对尾砂料浆浓密性能的影响及机理[J].工程科学学报,2019,41(11):1405-1411.
Zhou Qian, Liu Juanhong, Wu Aixiang, et al. Influence mechanism of flocculant dosage on tailings thickening[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(11):1405-1411.

[59] 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.

[60] Shi Yong, Zheng Bokun, Lai Wei, et al. Ultrasonic-enhanced flocculation and sedimentation of lead-zinc tailings: mechanisms and efficiency improvements[J]. Ultrasonics, 2025,156:107751.

[61] 袁子淇,黄腾龙,林敏,等.基于PSO-SVM的尾砂仓储浓密机放砂稳定性分析[J].矿业研究与开发,2025,45(1):95-102.
Yuan Ziqi, Huang Tenglong, Lin Min, et al. Analysis of desanding stability of tailings storage thickener based on PSO-SVM[J]. Mining Research and Development,2025,45(1):95-102.

[62] 郑伯坤,尹旭岩,黄腾龙,等.深井充填料浆改性调压输送技术试验研究[J].矿业研究与开发,2020,40(5):32-35.
Zheng Bokun, Yin Xuyan, Huang Tenglong, et al. Experimental study on modified pressure regulation transportation technology of deep mine filling slurry[J]. Mining Research and Development,2020,40(5):32-35.

[63] 杨鑫,郑伯坤,邓高岭,等.基于环管试验的尾矿水力输送性能研究[J].矿业研究与开发,2023,43(1):26-31.
Yang Xin, Zheng Bokun, Deng Gaoling, et al. Study on hydraulic transportation properties of tailings based on loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(1):26-31.

[64] 陈启荣,李平,郑伯坤,等.磷矿浆水力输送参数试验研究[J].采矿技术,2025,25(4):218-225.
Chen Qirong, Li Ping, Zheng Bokun, et al. Experimental study on hydraulic conveying parameters of phosphate slurry[J]. Mining Technology,2025,25(4):218-225.

[65] 于正.絮凝剂对超细尾砂料浆流变与管输特性影响规律研究[D].长沙:中南大学,2024.
Yu Zheng. Research on the impact patterns of residual flocculant on rheological and pipeline transport characteristics of ultra-fine tailings slurry[D]. Changsha: Central South University,2024.

[66] 王志荣,石锦民,王新坤,等.增稠剂对膏体充填料浆流动特性的影响及其工程应用[J].有色金属科学与工程,2024,15(1):97-104.
Wang Zhirong, Shi Jinmin, Wang Xinkun, et al. Effect of thickeners on the flow characteristics of paste filling slurry and its engineering application[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2024,15(1):97-104.

[67] 黄欣,高博,寇云鹏.基于半工业环管试验的充填料浆输送压力损失预测模型[J].矿业研究与开发,2023,43(6):57-61.
Huang Xin, Gao Bo, Kou Yunpeng. Pressure loss prediction model of filling slurry transportation based on semi-industrial loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(6):57-61.

[68] 郑伯坤,张鹏强,尹旭岩,等.深井低倍线充填管道调压技术研究[J].采矿技术,2019,19(1):31-33.
Zheng Bokun, Zhang Pengqiang, Yin Xuyan, et al. Study on pressure regulation technology for filling pipeline with low line ratio in deep mine[J]. Mining Technology,2019,19(1):31-33.

[69] 徐东升.深井充填管道输送系统减压技术探讨[J].矿业快报,2007(2):25-28.
Xu Dongsheng. Discussion on pressure reduction technology for deep well filling pipeline transportation system[J]. Express Information of Mining Industry,2007(2):25-28.

[70] 杨超,吕文生,杨鹏.螺旋扭曲扁管料浆输送流阻特性[J].矿业研究与开发,2017,37(3):33-38.
Yang Chao, Lyu Wensheng, Yang Peng. The flow resistance characteristics of slurry transportation in twisted oblate pipe[J]. Mining Research and Development,2017,37(3):33-38.

[71] 刘行,吕文生,杨鹏,等.基于CFD-DEM耦合的螺旋管料浆输送特性与磨损分析[J].矿业研究与开发,2022,42(11):200-207.
Liu Xing, Lyu Wensheng, Yang Peng, et al. Analysis on slurry transportation characteristics and wear of spiral pipe based on CFD-DEM coupling[J]. Mining Research and Development,2022,42(11):200-207.

[72] 路燕泽,李仁会,刘志义,等.考虑料浆温度影响的细尾砂膏体自流输送研究[J].矿业研究与开发,2021,41(10):33-39.
Lu Yanze, Li Renhui, Liu Zhiyi, et al. Study on gravity conveying of fine tailings paste considering the influence of slurry temperature[J]. Mining Research and Development, 2021,41(10):33-39.

[73] 郑伯坤.全尾砂充填料浆改性调压输送数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):116-119.
Zheng Bokun. Numerical simulation on property modification and pressure-regulated transportation of filling slurry with full tailings [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3):116-119.

[74] 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 ofmodified unclassed tailings filling slurry based on loop test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(2):520-529.

[75] 何文,何耿烽.基于 CFD-DEM 法的矿山充填料浆对管道磨损的影响[J].中国安全科学学报,2026,36(5):113-121.
He Wen, He Gengfeng. Influence of pipelines wear by mine backfill slurry based on CFD-DEM method[J]. China Safety Science Journal,2025,45(3):14-21.

[76] 王永军,胡东祥,郑辉,等.充填料浆对变径弯管的冲蚀磨损特性分析[J].矿冶工程,2025,45(3):14-21.
Wang Yongjun, Hu Dongxiang, Zheng Hui, et al. Analysis of erosive wear characteristics of backfill slurry on reducing bends[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(3):14-21.

[77] 祝鑫,仵锋锋,尹旭岩,等.尾砂胶结充填料浆输送管道阻力及磨损分析模拟研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):120-124.
Zhu Xin, Wu Fengfeng, Yin Xuyan, et al. Simulation study on resistance and wear of filling transportation pipeline of tailing cemented filling slurry [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3):120-124.

[78] 白秉哲,高古辉,刘文利.浆体输送用贝氏体管道的磨损机制及耐磨性能研究[J].矿山机械,2012,40(12):101-103.
Bai Bingzhe, Gao Guhui, Liu Wenli. Study on wear mechanism and wear resistance property of bainitic pipeline for slurry transportation [J]. Mining & Processing Equipment, 2012, 40(12):101-103.

[79] 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. Study on resistance characteristics and erosion wear of coarse aggregate filling transportation pipeline[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):53-59.

[80] 查益程,陈炜峰,刘雪飞,等.管道机器人研究综述[J].机械传动,2025,49(9):175-192.
Zha Yicheng, Chen Weifeng, Liu Xuefei, et al. A review on pipeline robots [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025,49(9):175-192.

[81] 臧延旭,倘向阳,赵宣,等.流体驱动式管道裂纹检测机器人探头结构设计[J].机床与液压,2016,44(11):50-53.
Zang Yanxu, Tang Xiangyang, Zhao Xuan, et al. Structural design of a fluid-driven pipeline crack inspection robot probe [J]. Machine Tool & Hydraulics,2016,44(11):50-53.

[82] 田逸宁,张舜,张洪星,等.用于海底管道巡检的常驻型水下机器人[J].船舶工程,2024,46(增刊 1):303-308.
Tian Yining, Zhang Shun, Zhang Hongxing, et al. Resident underwater robot for subsea pipeline inspection [J]. Ship Engineering,2024,46(Suppl.1):303-308.

[83] 温龙新,杨晨晖,焦鹏.上向进路充填采矿法充填接顶方案优化[J].现代矿业,2024,40(1):95-97+101.
Wen Longxin, Yang Chenhui, Jiao Peng. Optimization of filling roof-contacting scheme in upward drift cut-and-fill mining method [J]. Modern Mining, 2024, 40(1): 95-97+101.

[84] Yin Shenghua, Yan Zepeng, Chen Xun, et al. Active roof-contact: the future development of cemented paste backfill [J]. Construction and Building Materials,2023,370:130657.

[85] 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 contact rate[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,75(3): 124-130+136.

[86] 栾茂旭,袁锦锋,陶龙,等.膨胀剂在充填接顶中的应用研究[J].现代矿业,2024,40(10):58-62.
Luan Maoxu, Yuan Jinfeng, Tao Long, et al. Application of expansion agent in backfill roof contact[J]. Modern Mining, 2024,40(10):58-62.

[87] 江鹏.紫金山深部铜矿矿房充填接顶技术研究[J].福建冶金,2022,51(6):8-10.
Jiang Peng. Study on the technology of filling roof contact in the deep copper mine of Zijinshan[J]. Fujian Metallurgy, 2022,51(6):8-10.

[88] 程文文.等量分流技术在上向进路充填接顶中的应用[J].黄金,2018,39(3):40-43.
Cheng Wenwen. Application of equal diversion technology in the roof contact of upward drift filling[J]. Gold, 2018, 39(3):40-43.

[89] 杨岳阳,毛建华.采空区充填接顶控制措施及效果监测[J].采矿技术,2021,21(6):83-85.
Yang Yueyang, Mao Jianhua. Control measures and effect monitoring of backfilling and roof contact in goaf[J]. Mining Technology,2021,21(6):83-85.

[90] 周强,唐恺.冬瓜山铜矿提高采场接顶率的技术措施[J].现代矿业,2018,34(12):108-110.
Zhou Qiang, Tang Kai. Technical measures for improving roof contact rate of Dongguashan Copper Mine[J]. Modern Mining,2018,34(12):108-110.

[91] 徐培良.下向充填采矿接顶工艺探讨[J].世界有色金属,2017(1):193-194.
Xu Peiliang. Discussion on roof contact technology of underhand cut and fill mining method[J]. World Nonferrous Metals,2017(1):193-194.

[92] 康国华,白龙剑,王洪江,等.地下矿山新型浮箱式膏体充填接顶技术研究及应用[J].矿产保护与利用,2024,44(2):46-51.

Kang Guohua, Bai Longjian, Wang Hongjiang, et al. Investigation of new floating box paste backfill roof contact technology in underground mines[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(2):46-51.

[93] 柳小胜,罗佳,王长军.袋装充填及充填膨胀剂在大面积空区接顶充填中的应用探讨[J].矿业研究与开发,2018,38(3):31-35.
Liu Xiaosheng, Luo Jia, Wang Changjun. Application of geotextile bags filling and filling expansive agent on the roof-contact filling in a large-scale goaf[J]. Mining Research and Development,2018,38(3):31-35.

[94] Wang Shaoyong, Wang Zhenqi, Chen Chong, et al. Insight into the active roof-contact of cemented paste backfill: a high-efficient expansion material[J]. Case Studies in Construction Materials,2024,20:e03123.

[95] Pan Jilong, Zhang Qinli, Feng Yan, et al. Low-foam-rate expansive cemented paste backfill for facilitating active roof-contact: correlation mechanisms between expansion properties and mechanical properties[J]. Journal of Building Engineering,2025,113:114063.

[96] Tu Bingbing, Liu Lang, Ding Xiang, et al. Active roof-contacted combined backfill mining technology based on a modified magnesium slag-based cementitious material[J]. Minerals Engineering,2024,216:108916.

[97] Wang Zhenqi, Wu Aixiang, Wang Shaoyong, et al. Effect and mechanism of time-dependent and economical expansion materials in improving the active roof-contact for cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2024,439:137339.

[98] Wan Zheng, Yao Nan, Yu Zhenjian, et al. Liquid-solid dual-phase expansion behavior and strength characteristics of expansive backfill[J]. Cement and Concrete Composites, 2026,169:106510.

[99] Xu Shuai, Suorineni Fidelis T, Li Kunming, et al. Evaluation of the strength and ultrasonic properties of foam-cemented paste backfill[J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment,2017,31(8):544-557.

[100] Wu Di, Zhang Yongliang, Liu Yucheng, et al. Mechanical performance and ultrasonic properties of cemented gangue backfill with admixture of fly ash[J]. Ultrasonics,2016,64: 89-96.

[101] He Wen, Zheng Changsong, Li Shenhai, et al. Strength development monitoring of cemented paste backfill using guided waves[J]. Sensors,2021,21(24):8499.

[102] Yu Sunqiang, Jiang Haiqiang, Xi Zhangyao, et al. Image analysis as a geometry- and integrity-independent tool for predicting strength of cemented tailings backfill using slag-based binder[J]. Construction and Building Materials,2024, 444:137867.

[103] Na Qing, Chen Qiusong, Wang Daolin, et al. A novel non-destructive testing method for the uniaxial compressive strength of cemented paste backfill based on hyperspectral imaging and artificial intelligence[J]. NDT & E International,2026,160:103654.

[104] Abdulkadir Sakariyau Babatunde, Chen Qiusong, Yilmaz Erol, et al. Comparative and meta-analysis evaluation of non-destructive testing methods for strength assessment of cemented paste backfill: implications for sustainable pavement and concrete materials[J]. Materials (Basel, Switzerland),2025,18(12):2888.

[105] 杨云飞,邓代强,龙云刚,等.采空区充填体原位采样与力学性能检测[J].中国钼业,2024,48(5):25-32.
Yang Yunfei, Deng Daiqiang, Long Yungang, et al. In-situ sampling and mechanical property testing of backfill in goaf[J]. China Molybdenum Industry,2024,48(5):25-32.

[106] Chen Qiusong, Zhang Qinli, Fourie Andy, et al. Experimental investigation on the strength characteristics of cement paste backfill in a similar stope model and its mechanism[J]. Construction and Building Materials,2017, 154:34-43.

[107] Wei Chong, Apel Derek B, Xu Huawei, et al. Heterogeneity of field cemented rockfill at a Canadian hard-rock mine[J]. Underground Space,2025,23(4):279-284.