

金矿尾砂多途径资源化高效利用探索研究

乔晓飞^{1,2}, 张鹏涛², 宋 辉², 郎朋林², 刘焕新³, 寇云鹏³

(1. 北京科技大学资源与安全工程学院; 2. 包头市昶泰矿业有限责任公司; 3. 山东黄金矿业科技有限公司)

摘要:金矿尾砂是黄金提取(主要为氰化浸出或浮选)过程中产生的主要固体废弃物,其矿物组成以石英等脉石矿物为主,常含有残留的重金属及微量金。中国作为全球黄金生产和消费大国,金矿尾砂历史堆存总量巨大且仍在持续增长,然而其综合利用率长期处于较低水平。巨量尾砂堆存不仅侵占大量土地资源,其潜在的溃坝风险、扬尘污染及含氰/重金属渗滤液对水土环境的长期威胁尤为突出,亟须探索高效、规模化的金矿尾砂消纳与资源化途径。近年来,伴随矿业绿色发展战略的深入实施,金矿尾砂综合利用的基础研究、技术创新与工程应用取得了显著进展。以西部某金矿为工程背景,系统综述了金矿尾砂作为充填材料应用于井下采空区治理、建材化利用等方向的关键研究成果与应用实践,旨在为推进金矿尾砂的大宗、高值、环境友好型资源化利用提供理论参考与技术支持。

关键词:金矿尾砂;资源化;利用途径;采空区;充填;建材化

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0034-05

doi:10.11792/hj20251005

引 言

目前,国内金矿石品位较低,导致金矿尾砂产率高达95%以上^[1],同时,国内大部分黄金矿山已投产多年,常年生产使尾矿库堆存了大量尾砂,不仅占用大量土地资源,还会带来严重的环境安全隐患^[2-5]。

由于开采历史、技术、设备、市场及管理等因素,大量的有价元素和有用成分弃存于尾矿中,因此尾矿具有双重特性,它既是废物又是二次资源,从而构成了尾矿资源材料化利用和无害化处理的巨大潜力^[6-9]。党的十八大以来,生态文明建设和习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的理念已深入人心,国家政策和市场需求发生了很大变化,矿产资

源的供需矛盾进一步加剧,建设绿色矿山、开展尾矿综合利用已成为矿山企业可持续发展的必然选择。目前,回收有价元素、制备新型建材或道路材料、用于充填采空区、制备矿物复合肥料和土壤改良剂、开展地质生态复垦等已成为国内外尾矿综合利用的主要途径^[10-13]。西部某金矿同样面临相似的生产难题,尾矿库库容日益紧张,充填采空区后仍剩余约50%尾砂需处理,因此亟须开展尾砂多途径资源化高效利用探索研究^[14-15]。

1 尾砂性质分析

1.1 化学成分

采用ZSX100e型X射线荧光光谱仪对该矿山全尾砂进行化学成分检测,测试结果如表1所示。

表1 全尾砂主要化学成分分析

Table 1 Main chemical composition analysis of tailings

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Cl
w/%	62.6	15.2	7.20	5.86	3.10	2.31	1.16	0.902	0.548
成分	SO ₃	TiO ₂	BaO	SrO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	ZrO ₂	As ₂ O ₃
w/%	0.397	0.220	0.199	0.101	0.085 1	0.041 2	0.027 2	0.008 7	0.001 9

通过测试可知:该矿山全尾砂以SiO₂、Al₂O₃和CaO为主,占总量的80%以上,化学成分简单,杂质含量较少,是一种良好的惰性材料,适合作骨料。全尾砂中含有微量P₂O₅、SO₃、Cr₂O₃、As₂O₃,符合国家标准,

不影响充填体质量,且不会引发环境问题。

1.2 矿物组成

采用X射线衍射仪对该矿山全尾砂的主要矿物成分进行分析,测试结果如图1所示。试验用X射线

收稿日期:2025-06-17; 修回日期:2025-07-11

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2024ME045)

作者简介:乔晓飞(1983—),男,高级工程师,从事金属矿山井下开采技术研究工作;E-mail:985315860@qq.com

衍射仪,Cu靶,扫描范围10°~70°,工作电压和工作电流为40 kV和40 mA,步长为0.02°,测角精度为 $2\theta\leq\pm0.01^\circ$,角分辨率为 $\text{FWHM}\leq\pm0.1$,角度重现性为 $\pm0.0001^\circ$ 。通过测试可知,该矿山全尾砂主要矿物物相为石英、钠长石和微量白云母,基本无活性,适合用作骨料。

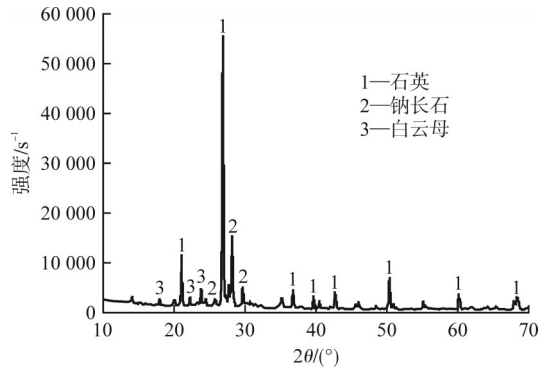


图1 全尾砂XRD衍射谱图
Fig. 1 XRD diffraction spectrum of tailings

1.3 微观结构

采用Quanta 250型场发射环境扫描电子显微镜观测全尾砂的微观结构形貌,仪器参数:加速电压为高真空30 kV下1.0 nm(SE)、环境真空1 kV下3.0 nm(SE),低真空30 kV下1.4 nm(SE),环境真空30 kV下1.4 nm(SE)。分别对2种尾砂放大5 000倍、20 000倍、50 000倍、100 000倍观测其微观形态,结果如图2所示。

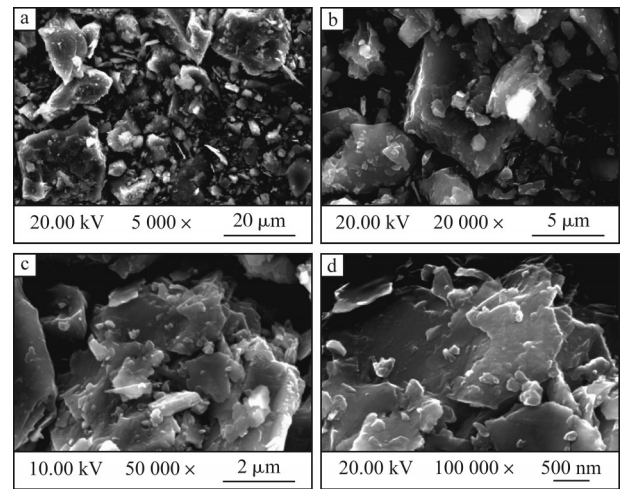


图2 全尾砂微观结构形貌
Fig. 2 Micromorphology of ungraded tailings

在扫描电镜高倍镜的镜头下,该矿山全尾砂外观呈片状、块状,棱角状居多,表面凹凸不平,似圆形仅占一小部分,粒径分布不均匀,内部结构排列不规整;颗粒大小不一且形状不规则,含有许多独立的散体颗粒,颗粒没有特定外貌形状,表面极不光滑,并且全尾砂所含成分在晶体内所占据的位置不同。

1.4 粒级组成

采用Mastersizer 3000激光粒度仪测定其粒径分布,结果如图3所示。

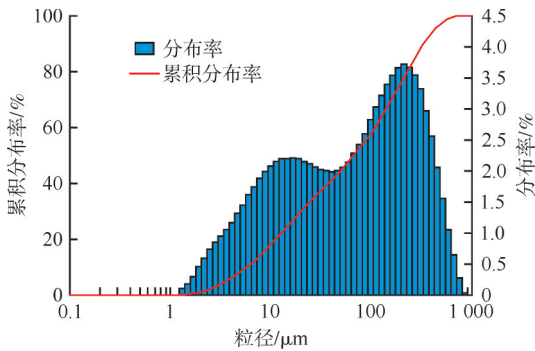


图3 全尾砂粒径分布图
Fig. 3 Particle size distribution of ungraded tailings

1.5 尾砂pH和重金属成分分析

将该矿山全尾砂委托第三方检测机构进行pH和重金属成分检测,结果如表2、表3所示。

检测结果表明,按照HJ/T 299—2007《固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》酸浸规定方法进行毒性浸出,采用GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》标准限值评判,检测点位检测参数的检测结果均符合GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》标准限值的要求。

按照HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》规定方法进行浸出检测,检测点位检测参数的检测结果均符合GB 8978—1996《污水综合排放标准》第二类污染物一级标准排放浓度标准限值的要求。

2 金矿尾砂的危害

2.1 环境污染源形成

未能有效处置的尾矿暂存于自然环境,易发生氧化作用,产生大量酸性矿山废水(AMD)或含重金属粉

表2 尾砂毒性浸出液检测结果(水浸)

Table 2 Testing results of toxic leachate from tailings (water leaching)											mg/L	
项目	pH ¹⁾	砷	汞	氰化物	六价铬	氟化物	铅	镉	锌	铜	铁	锰
全尾砂	8.64	0.011	0.000 18	<0.001	<0.004	1.92	<0.06	<0.05	<0.06	<0.02	<0.03	0.07
标准 ²⁾	6~9	0.5	0.05		0.5	10	1.0	0.1	2.0	0.5		2.0
标准 ³⁾		5	0.1	100	5	0.1	5	1	100	100		

注:1)pH无量纲;2)GB 8978—1996《污水综合排放标准》;3)GB 5085.1—2007《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》。

表3 尾砂毒性浸出液检测结果(酸浸)
Table 3 Testing results of toxic leachate from tailings (acid leaching)

项目	氟化物	铅	镉	锌	铜	砷	汞	六价铬	铁	锰
全尾砂	2.39	<0.06	<0.05	<0.06	<0.02	0.003 4	0.001	<0.004	<0.03	0.40
标准 ¹⁾	100	5	1	100	100	5	0.1	5		

注:1)GB 5085.1—2007《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》。

尘,构成显著环境污染源。此类废水不仅pH极端(强酸性或强碱性),而且常含有高毒性重金属离子(如Cd、Pb、Hg、As等)。这些重金属离子在环境中具有持久性、生物累积性和毒性(PBT特性),自然生物难以降解,且易通过生物富集和生物放大作用在土壤及农作物中累积,并经由食物链进入人体,威胁人体健康。此外,尾矿中残留的选矿药剂(如氰化物、黄药等)也具有直接毒性。AMD通过地表径流污染耕地土壤,破坏农作物生长环境,导致作物污染、减产;同时污染地表水体和地下水,毒害水生态系统。

2.2 自然灾害风险诱发

矿产资源大规模开发导致尾矿堆存,占地面积持续扩大,尾矿库坝体高度随之增加,安全隐患日益严峻。巨量尾矿堆存条件下,一旦发生尾矿库溃坝事故,极易诱发次生地质灾害,如山体滑坡、泥石流等。据统计,中国约33%的尾矿库存在重大安全隐患,且多数处于超期服役、超库容运行状态,导致溃坝事故频发,造成重大人员伤亡与财产损失。自20世纪50年代以来,国内已发生多起重大事故(例如,云南锡业公司溃坝事故,造成200余人伤亡、数千公顷农田被淹);国际案例亦不鲜见(例如,罗马尼亚尾矿坝泄漏事故,致10万余升含氰化物、铜、铅等污染废水排入蒂萨河,对多瑙河流域生态造成灾难性影响)。

2.3 土地与植被破坏

矿产资源开发活动引发大规模地表扰动,导致矿区植被覆盖严重受损。目前,除少量尾矿可通过综合利用技术(如充填、建材化利用等)回收外,绝大部分堆存于自然环境,造成大面积土地占用。尤其值得注意的是,大量优质耕地因此丧失。中国作为人口众多、人均耕地面积远低于全球平均水平的农业大国,耕地资源本已稀缺。尾矿堆存对土地的持续侵占,进一步加剧了土地资源紧张局面,对区域生态环境及农业可持续发展构成沉重压力。

2.4 矿产资源浪费

中国矿产资源普遍具有品位低、共伴生组分复杂的特点,其综合利用率仅约20%。据报道,因开发过程中的资源浪费,年经济损失高达千亿元。尤其在早期开采中,受限于当时采选技术水平,仅能回收易采

或高品位部分,导致大量低品位矿石、有价金属(如Fe、Cu、Au等)、稀有元素(如Li、REE等)及非金属矿物(如长石、石英等)随尾矿流失,造成矿产资源的严重不可逆浪费。

3 金矿尾砂资源化利用途径

3.1 井下充填采空区

金矿尾砂的主要利用途径为井下充填采空区,通常采用尾矿配加水泥等胶凝材料充填至井下采空区,不仅可以有效降低采空区的安全隐患,还可以大规模消纳尾矿(约占浮选尾砂的50%)。

目前,该矿山已建成一套压滤尾砂连续计量搅拌高浓度充填系统用于井下充填采空区,选矿厂压滤尾砂通过铲运机倒入配料机,然后由配料机底部的皮带输送机给到搅拌机。同时,胶凝材料仓内的水泥通过螺旋给料机运输到搅拌机,搅拌后的充填料浆通过管路输送至料浆缓存斗,由充填工业泵加压后经充填管路输送至井下进行连续充填。充填工艺流程如图4所示,井下充填体强度如表4所示。

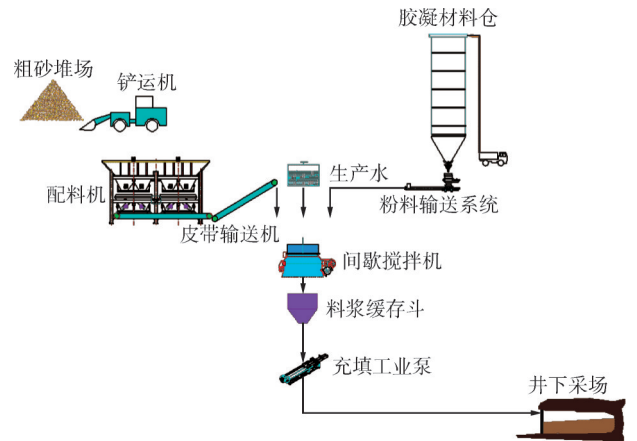


图4 充填工艺流程图

Fig. 4 Flowchart of the filling process

3.2 厂区铺路

为进一步论证尾砂+碎石作路基的合理性,该矿山以混凝土行业标准为参照开展室内试验,浇筑尾砂+碎石的试件,开展可行性研究。基于混凝土C30配比进行前期探索试验后,根据尾砂细度调整尾砂、

表 4 井下充填体单轴抗压强度测试结果

Table 4 Test results of uniaxial compressive strength of underground filling bodies

料浆浓度/%	灰砂比	单轴抗压强度/MPa		
		3 d	7 d	14 d
64	1:4	0.546 0	0.756 8	1.538 6
	1:8	0.220 0	0.264 4	0.423 6
	1:15		0.084 4	0.151 6
66	1:4	0.924 0	1.232 4	1.984 6
	1:8	0.280 0	0.324 8	0.500 6
	1:15	0.068 0	0.124 0	0.223 2
68	1:4	1.056 9	1.415 3	2.193 2
	1:8	0.366 2	0.437 8	0.733 3
	1:15	0.104 7	0.191 2	0.306 5
70	1:4	1.365 4	1.998 2	2.841 9
	1:8	0.462 2	0.724 6	1.074 5
	1:15	0.165 6	0.276 8	0.425 1

碎石、水泥的添加比例,最终确定了料浆浓度为 82%,水泥、尾砂和碎石的质量比为 1:1:1,1:1.5:1.5 和 1:1:2 并开展基础试验,试验结果如表 5 所示,在此基础上给出工程用量的配比。不同比例的尾砂+碎石试样如图 5 所示。

表 5 尾砂+碎石路基试验测试结果

Table 5 Test results of tailings + gravel subgrade

各种材料质量比	单轴抗压强度/MPa			
	1 d	3 d	7 d	28 d
1:1.5:1.5	3.7	6.8	11.9	20
1:1:2	2.1	6.8	11.4	22.4
1:1:1	6	14	23.3	31.4
标准 C30 配比	2.1	6.2	18	30.7

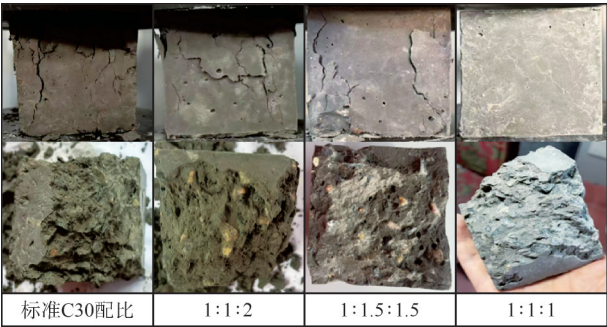


图 5 不同比例的尾砂+碎石试样

Fig. 5 Tailings + gravel specimens with different proportions

3.3 建材化利用

1) 机制砂石骨料。围绕尾砂制备机制砂石骨料的研究与应用,是当前建材行业实现资源综合利用与绿色发展的关键方向。在国家政策层面,利用尾矿废石生产机制砂石已被列为重点发展领域,例如《关于推进机制砂石行业高质量发展的若干意见》明确提出,鼓励尾矿资源化利用,以实现“变废为宝”。技术

层面,尾砂为选矿分选后的副产品,需通过破碎、整形等工艺加工成符合建筑标准的骨料,其颗粒形态、级配和微粉含量(如细度模数、石粉比例)直接影响混凝土性能。相较于天然砂或常规机制砂,尾砂机制砂需重点解决体积安定性不良、重金属离子含量高等问题,确保材料安全性与稳定性。未来,通过优化制备工艺和严格质量控制,尾砂机制砂既能缓解天然砂资源短缺,又能减少尾矿堆存的环境风险,形成资源循环、环保效益与产业升级协同推进的可持续发展路径。

2) 尾砂制建筑加气砖。尾砂作为矿山选矿废弃物,通过资源化技术可转化为环保型加气砖。其核心工艺包括:尾砂预处理(500℃~600℃煅烧),与粉煤灰、水泥、石灰及生物质增抗剂等混合搅拌,浇筑切割后经高压蒸汽养护(190℃~200℃,0.9~1.1 MPa,10~13 h)成型。该技术显著降低了原料成本,提升了固体废弃物利用率,成品兼具轻质性(400~800 kg/m³)、优异隔热抗震性能,且生物质添加剂的引入进一步增强了砖体稳定性和强度。尾砂加气砖实现了建筑材料的绿色转型,为矿业固体废弃物资源化提供了有效路径。胶东某金矿将-74 μm 的尾砂、焦宝石粉的混合黏土按 75%和 25%的比例混合加水,搅拌均匀,脱水后控制 6%~8%的水分,经 60 t 压力机压制成形,在箱式电炉中温度均匀上升到 130℃保温后取出,即为达标的建筑砖(如图 6 所示)。

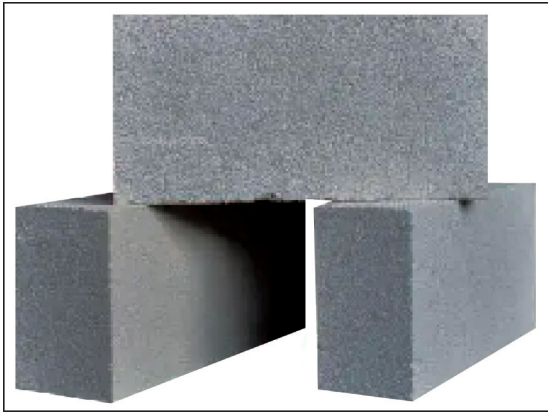


图 6 尾砂制建筑加气砖

Fig. 6 Aerated building bricks made from tailings

4 结 论

1) 金矿尾砂作为典型的矿业固体废弃物,既是潜藏溃坝风险与重金属/氰化物污染源的环境隐患体,也是富含硅铝酸盐及微量有价值金属的二次矿产资源。基于其矿物组成、粒度分布及地球化学特性,定向选择资源化技术路径,既可实现堆存环境风险的源头治理,又能创造显著的资源经济效益。

2)采用金矿尾砂进行矿山采空区充填,是当前最具工程普适性的消纳方式。这种途径成本较低,尾砂消纳量大,且对尾砂理化性质和原料稳定性的要求较低,但受限于产品附加值,主要体现为环境成本内部化效益,直接经济产出有限。

3)尾砂基建材化利用(如地质聚合物、陶瓷坯料、微晶玻璃、硅钙板原料等)代表资源增值方向,符合循环经济与低碳转型双重目标。但受限于原料性能、工艺适配等,仍需进一步开展相关研究。

[参 考 文 献]

[1] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报,2022,44(1):11-25.

[2] 梁超,马宏伟.阜山金矿尾砂综合利用及充填系统研发与应用[J].中国矿业,2023,32(增刊1):223-228.

[3] 谭巍.金矿尾砂的生态危害评价及其作为混凝土集料的研究[D].湘潭:湘潭大学,2023.

[4] 王海龙.三山岛金矿尾砂制备微晶泡沫玻璃实验研究[D].沈阳:东北大学,2020.

[5] 陈维铅,李玉宏,许世鹏,等.TiO₂和Cr₂O₃作晶核剂对金矿尾砂微晶玻璃结晶性能的影响[J].人工晶体学报,2015,44(3):836-840.

[6] 陈维铅.金矿尾砂微晶玻璃的制备及性能研究[D].西安:陕西科技大学,2014.

[7] 陈维铅,高淑雅,董亚琼,等.烧结法制备金矿尾砂CaO-Al₂O₃-SiO₂微晶玻璃及其性能研究[J].硅酸盐学报,2014,42(1):95-100.

[8] 高淑雅,陈维铅,董亚琼,等.熔融法制备金矿尾砂微晶玻璃及性能测试[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2013,31(5):58-61.

[9] 陈帮金,赵晨阳,瞿广飞,等.含重金属尾矿资源化利用研究进展[J].有色金属(矿山部分),2022,74(2):116-125.

[10] 区雪连.重金属尾矿与陶瓷浆制备发泡陶瓷的工艺研究[J].陶瓷,2018(9):17-22.

[11] 孙铭骏,杨纪光,杨帆,等.三山岛金矿尾砂高浓度充填强度特性试验研究[J].黄金,2024,45(12):56-60.

[12] 常宝孟.金矿尾矿库重金属释放规律及污染风险研究[D].北京:北京科技大学,2023.

[13] 董国强,于涛,童玉升.夏甸金矿细颗粒尾砂充填技术研究与应用[J].黄金,2024,45(3):9-14.

[14] 陈桢宇,李晓飞,孟文文,焦家金矿无废矿山建设工程实践[J].黄金,2022,43(5):93-96,100.

[15] 梁新民,刘明权,张爱民,等.无废、无尾生态智能矿山建设模式探讨[J].中国矿山工程,2022,51(2):66-71.

Exploration on efficient multi-path resource-based utilization of gold mine tailings

Qiao Xiaofei^{1,2}, Zhang Pengtao², Song Hui², Lang Penglin², Liu Huanxin³, Kou Yunpeng³

(1. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing;

2. Baotou Changtai Mining Co., Ltd.; 3. Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd.)

Abstract: Gold mine tailings represent the main solid waste generated during gold extraction (primarily through cyanide leaching or flotation processes), and quartz and other gangue minerals are their main composition, often containing residual heavy metals and trace amounts of gold. As a major global producer and consumer of gold, China has a vast historical accumulation of gold mine tailings, which continues to grow, while the comprehensive utilization rate remains low. The massive stockpiling of tailings occupies substantial land resources, and potential dam failures, dust pollution, and long-term threats to water and soil environments from cyanide/heavy metal leachates are prominent. Therefore, there is an urgent need to explore efficient approaches for the large-scale consumption and resource utilization of gold mine tailings. In recent years, with the deepening implementation of green mining development strategies, remarkable progress has been made in basic research, technological innovation, and engineering applications for the comprehensive utilization of gold mine tailings. By taking a gold mine in western China as an engineering background, key research achievements and practical applications of gold mine tailings as filling material in underground goaf management and construction material utilization were systematically reviewed, aiming to provide theoretical reference and technical support for promoting bulk, high-value, and environmentally friendly resource-based utilization of gold mine tailings.

Keywords: gold mine tailings; resource-based utilization; utilization approach; goaf; filling; construction material-based