

金尾矿资源化利用研究进展

杨玮^{1,2,3}, 常东^{1,2,3}, 龙涛^{1,2,3}, 邓莎^{1,2,3}

1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 陕西省黄金与资源重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学绿色选冶协同技术与装备研究所, 陕西 西安 710055

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0168-11
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.020

摘要 金尾矿大量堆存不仅占用了宝贵的土地资源, 而且存在极大的安全隐患。这些尾矿中部分金属元素和非金属矿物含量较高, 具有较大回收价值与资源化利用前景。针对金尾矿的资源化利用, 详细阐述了金尾矿回收金、铁、铅等有色金属和石英、长石、绢云母等非金属矿物的技术路径与工艺特点, 分析研究了金尾矿活化后作为胶凝材料用于采区充填的技术方案, 同时对金尾矿制备混凝土、烧结砖、陶粒、泡沫陶瓷等建筑材料的研究进展进行了综述。最后综合评述了金尾矿资源化利用存在的问题和研究发展方向。

关键词 金尾矿; 资源化利用; 有色金属; 非金属矿物; 采区充填; 建筑材料

1 引言

中国黄金矿产资源丰富, 2022 年自然资源部发布的《2021 年全国矿产资源储量统计表》中金储量为 2 964.37 t^[1]。随着黄金矿产资源的开发利用, 金尾矿的堆积量也逐年增长, 当前全国金尾矿的堆存量为 2 亿 t, 并且以年 2 450 万 t 的速度增长, 如图 1 所示。然而, 我国的金尾矿资源综合利用率较低, 仅有 36.9%^[3]。大量的金尾矿堆存于尾矿库中, 不仅占用了宝贵的土地资源, 还存在极大的安全、环保风险隐患^[4-7]。在雨季尾矿库容易发生山体滑坡、泥石流等次生地质灾害, 甚至存在尾矿库溃坝的潜在风险; 而且尾矿也是沙尘暴的重要尘源之一^[8-9]。此外, 金尾矿中残留的重金属离子、浮选药剂及硫化矿物易产生的酸性废水, 在一定条件下通过大气和水土等媒介, 以“污染转移”等不同形式造成诸如土壤污染、耕地退化和植被损毁等情况, 进而威胁到人和动物的正常生活^[10-11]。同时, 2020 年应急管理部等八部委联合印发了《防范化解尾矿库安全风险工作方案》, 提出原则上尾矿库数量只减不增^[12]。这将导致很多黄金企业未来极有可能会面临有矿生产而无库堆存的窘境。综上所述, 探寻新的金尾矿利用方式势在必行。

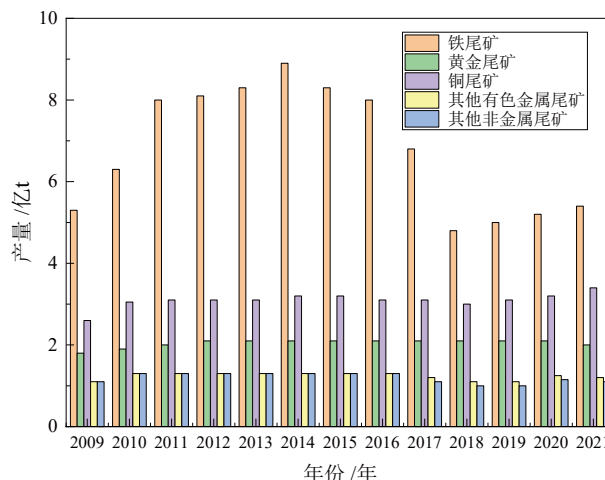


图1 全国不同类型尾矿的堆存量^[2]

Fig. 1 Piles of different types of tailings in China (Photo source from the Internet)^[2]

金尾矿是指在金矿石选别作业中提取有用组分后排出的固体废弃物。从化学成分上看, 金尾矿中主要含有 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 等熔剂型化合物和少量 Au 、 Ag 、 Fe 、 Cu 、 Pb 和 Zn 等金属元素; 从矿物组成上看, 主要包括石英、长石、云母、黏土和残余金属矿物等^[3]。大多金尾矿由 80% 以上的硅铝氧化

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52174261); 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBGY-053)

作者简介: 杨玮 (1971—), 男, 河南灵宝人, 教授, 博士生导师, 从事稀贵金属选冶、资源综合回收及矿业经济研究工作, E-mail: ywmsco@126.com。

通信作者: 常东 (1996—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 从事资源综合回收研究工作, E-mail: 3268608104@qq.com。

物组成,与建筑材料成分相似^[13-15]。表现出明显的资源特征,资源化利用潜力巨大。

我国对于金尾矿资源化利用的研究始于 20 世纪 80 年代末期,起步较晚^[16]。近年来,随着资源日益枯竭及环保压力增大,尾矿资源化利用已经成为当前的研究热点。本文从金尾矿资源化利用出发,重点阐述了从金尾矿中回收有价成分、利用金尾矿充填采空区、利用金尾矿制作建筑材料(如混凝土、砖、陶粒和陶瓷)等研究,以期为金尾矿资源化利用提供有益借鉴。

2 回收有价金属与有用矿物

金尾矿中主要含有 Au、Ag、Cu、Zn 和 Fe 等金属

表 1 不同金尾矿回收工艺及特点

Table 1 Different recovery processes and characteristics of gold tailings

尾矿来源/回收金属	处理工艺实例	处理效果	特点	参考文献
硫化物包裹金尾矿/回收金	两粗两精浮选	金品位: 52.31 g/t、回收率: 28.59%	回收率低	[23]
	碱浸—ZJ-1浸出	金浸出率: 70.81%	采用新药剂浸出率有提升	[24]
	酸浸预处理—浮选预富集—浮选中矿再磨—氰化浸出	浮选精矿: 金品位 21.65 g/t、回收率 21.62%; 浸出率 58.83%	回收率高, 但毒性强	[25]
氧化物包裹金尾矿/回收金	再磨—浮选—尾矿细磨—非氰浸出	浮选精矿: 金品位 38.77 g/t、回收率 44.97%; 浸出率 30.59%	选冶联合回收率较高, 且药剂毒性小	[26]
石英脉型富铁金尾矿/回收铁	磁化焙烧—磁选—反浮选	铁精矿: 铁品位 56.73%、回收率 55.57%	回收率较低	[29]
	分散态磁化焙烧—磁选	铁精矿: 铁品位 57.15%、回收率 81.43%	回收率较高	[30]
石英脉型富铜铅氧化尾渣/回收铜铅	混合浮选—铜铅混合精矿分离	铅精矿中铅、金和银品位分别为 68.40%、105.90 g/t、2 204.00 g/t, 回收率分别为 72.05%、55.59%、26.42%; 铜精矿中铜、金、银品位分别为 20.38%、9.60 g/t、696.60 g/t, 回收率分别为 98.92%、44.41%、73.58%	回收率高, 实现了尾矿中金属矿物的综合回收	[31]
石英脉型含钨金尾矿/回收钨	采用新捕收剂 CF-06、一粗三扫一精浮选	钨精矿: WO ₃ 品位 50.71%、回收率 71.06%	回收率高	[32]

2.1.1 金的回收

近年来,国内外学者在金尾矿选金工艺方面进行了大量研究,常用工艺主要包括重选法、浮选法、化学—水冶法和非氰浸出法等^[19-22]。李日升等^[23]采用重选、浮选、氰化浸出等方法对某金品位约为 0.7 g/t 的金尾矿进行处理,发现尼尔森重选工艺和浮选均能得到金品位超过 50 g/t 的金精矿。段明铭等^[24]对甘肃某金品位 1.53 g/t 的金尾矿采用新型环保浸金剂 ZJ-1,得到浸液中金浸出率为 70.81%。对于易于选别金尾矿使用新型药剂或改良浮选工艺即可实现金尾矿中部分金的回收,但回收率往往较低,仍有部分金残留于尾矿中。针对复杂难选的金尾矿,虽然尾矿中金品位较高,但想要有效回收金往往需要进行针对性的预处理。因此,杨玮等人^[25]针对陕西省某金品位 1.5 g/t 高硫包裹金型金尾矿采用酸浸预处理—浮选预富集—浮选中矿再磨—氰化浸出工艺回收金,通过硫酸预处理后经两次粗选得到的混合粗精矿产品中金品位

元素和大量云母、长石及石英等非金属矿物^[9]。国内矿山一般优先回收金尾矿中的有价金属,其次才会考虑对其他非金属矿物进行回收。

2.1 有价金属的回收

早期开采的金矿石品位较高,受限于当时的技术和经济水平,选金工艺大多只能选别出易于选别的裸露金,对于一些难选的包裹金大多未能选出。另外金尾矿中除金外还常伴生有其他有价金属矿物,早期金矿主要回收其中的贵金属,导致大多数伴生的有价金属未得到充分利用,使得其以尾矿形式堆积在尾矿库中,造成资源浪费^[17-18],研究人员对相应的有价金属进行了回收研究,不同金尾矿回收工艺及特点如表 1 所示。

6.94 g/t、金回收率 87.22%,实现了裸露金和硫化物包裹金的预先富集;粗精矿经一次抑硫精选,获得金品位 21.65 g/t 的金精矿;浮选中矿细磨至-400 目 95% 后采用氰化浸出 48 h,精选中矿浸出率 91.48%,实现了包裹金的分离回收,最终得到金的选冶联合总回收率 80.45%,实现了高硫包裹型难处理金尾矿资源的高效回收。随着环保压力的增加探索氰化浸出的替代工艺也尤为重要。常富强等^[26]针对河南某金品位 1.5 g/t 的金尾矿通过再磨—浮选—尾矿细磨—非氰浸出工艺,浮选获得金精矿中金品位 38.77 g/t、回收率 44.97% 的选矿指标;浮选尾矿细磨至-400 目 90% 后采用“金蝉”试剂浸出,尾矿金浸出率 30.59%,最终得到金的选冶联合总回收率 75.56%,该流程工艺成熟,药剂毒性小,有效地减少了金尾矿的再处理成本。

金尾矿中难选金大多以硫化物、碲化物、砷化物和炭质物包裹金形式存在^[27],金尾矿含金品位较低且已经过浮选或浸出作业处理,传统的重选和浮选工艺

已难以适用,应将预处理与非氰化浸出工艺相结合,形成低成本、高效、环保的回收工艺。

2.1.2 铁的回收

我国的铁矿以贫矿为主,据估计,中国铁矿石平均入选铁品位仅为 25.54%^[28]。部分金尾矿中铁品位已超出铁矿石的入选品位。张胜广等^[29]针对某含铁 35.11% 的金尾矿,采用磁化焙烧—磁选—反浮选工艺获得的铁精矿中铁品位 56.73%、回收率 55.57%,实现了含铁金尾矿的资源化利用。陈延信等^[30]针对某含铁 27.26% 的金尾矿,采用分散态磁化焙烧—磁选工艺获得的铁精矿中铁品位 57.15%、回收率 81.43%,提高了资源利用率。

金尾矿中铁通常以褐铁矿或黄铁矿形式存在,由于磁性较弱,通常先将尾矿中的铁先磁化焙烧再磁选或采用强磁选工艺。由于金尾矿中矿物组成的差异,金尾矿回收的铁精矿品位较低、含有杂质较多,后期研究中应进一步降低铁精矿中的有害杂质。

2.1.3 其他有色金属的回收

近年来,伴生有价金属综合回收的研究工作日益广泛。杨振兴等^[31]采用混合浮选—铜铅混合精矿分离工艺对金品位 0.90 g/t、银品位 19.29 g/t、铜品位 0.34%、铅品位 0.26% 的氰化尾渣中铜、铅进行了综合回收,获得的铅精矿中铅、金、银品位分别为 68.40%、105.90 g/t、2 204.00 g/t,回收率分别为 72.05%、55.59%、26.42%;铜精矿中铜、金、银品位分别为 20.38%、9.60 g/t、696.60 g/t,回收率分别为 98.92%、44.41%、73.58%,试验指标理想,实现了氰化金尾矿中金属资源的综合回收。周新民等^[32]根据河南灵宝某 WO_3 品位 0.103% 金尾矿特性,采用新捕收剂 CF-06、一次粗选三次扫选一次精选浮选流程,回收金尾矿中的伴生元素钨,最终获得了 WO_3 品位 50.71%、回收率 71.06% 的白钨精矿,实现了对该尾矿中有价元素的回收。

金尾矿中的有色金属(如铜、铅和钨)通常采用单一浮选工艺即可回收。然而精矿品位往往较低,回收率不高,因而后期研究中应在尾矿细磨或机械搅拌等预处理基础上优化浮选工艺,提高金尾矿中有价金属的回收效率。

2.2 非金属矿物的回收

金矿床中,石英、长石、绢云母等脉石矿物往往占据着绝大多数。在选金过程中,由于非金属矿物相比含金矿物的价值低,导致大量的非金属矿物废弃在尾矿中,造成了大量的资源浪费^[33]。因此,从金尾矿中回收非金属矿物意义重大。王江飞^[34]针对某含铁矿物 3%、石英 75% 的金尾矿采用磁选—脱泥—硫酸法浮选的工艺流程,获得的铁精矿铁品位 63.06%、回收

率 43.40% 和石英精矿 SiO_2 品位 97.53%、回收率 70.54%。魏转花等^[35]针对某金品位 0.77 g/t 的富长石金尾矿,采用摇床重选,获得的金精矿品位 41.15 g/t、回收率 46.84%;摇床尾矿经脱泥—弱磁选—2 段高梯度磁选联合工艺处理,得到的长石精矿产率 57.39%,其中氧化铁含量 0.23%,长石精矿达玻璃 I 级和陶瓷 II 级原料质量标准。黄曼等人^[36]针对某绢云母品位 25% 的金尾矿,采用一次粗选两次精选一次扫选的浮选工艺流程,获得了总回收率达到 65.84% 的绢云母精矿,其中一级绢云母精矿中氧化钾品位 7.86%、回收率 22.40%;二级绢云母精矿中氧化钾品位 6.69%、回收率 14.24%;三级绢云母精矿中氧化钾品位 5.27%、回收率 29.20%。该工艺通过浮选实现了富绢云母金尾矿中的绢云母分级回收,对这类矿石的资源化利用有着重要的参考价值。

金尾矿中非金属矿物的主要特点是含有 80% 以上的硅铝氧化物等矿物,借助浮选工艺可以有效回收石英、绢云母、长石等。非金属矿物精矿的品位要求高,未来若能通过工艺优化提高非金属矿物精矿的品位和回收率的同时兼顾回收有价金属,必将给尾矿的资源化利用提供一条新的思路。

3 金尾矿用于采空区充填

金矿开采深度加深,出现了大量的采空区。这些采空区的存在,限制了采矿工作的进行,同时也易造成地表沉降、地下水资源流失等各类生产、安全与环境问题。将金尾矿制成充填材料,应用于采空区充填,能够有效降低采空区的地压,预防采空区塌陷沉降,不仅有利于井下作业的安全,降低采矿损失率和贫化率,而且实现了金尾矿资源化利用^[37-38]。采区充填是大规模消纳金尾矿的主要途径之一。从充填材料发展来看,充填先后经历了干式充填、水砂充填和胶结充填,胶结充填先后经历低浓度胶结充填、高浓度胶结充填和膏体胶结充填 3 个发展阶段^[39]。

赵英良等^[40]通过碱熔活化提高金尾矿聚合材料的活性,采用碱熔活化后的金尾矿为胶凝材料,未活化的金尾矿为骨料制备出全尾矿膏体胶结充填材料。在灰砂质量比 1 : 6、料浆质量浓度 70% 时,28 d 抗压强度最高达 4.14 MPa。这一方案减少了一般胶凝材料的用量,降低了井下充填的成本。付万长^[41]采用添加质量分数 1% 的复掺化学激发剂(氢氧化钙:硅酸钠=3 : 1)活化山东招远某金尾矿,用活化后的金尾矿替代部分水泥,制备出满足井下充填需求的最优充填材料,配方为 $m(\text{原金尾矿}) : m(\text{活化金尾矿}) : m(\text{水泥}) = 75\% : 20\% : 5\%$,充填料浆质量浓度为 75%,充填材料 28 d 抗压强度 3.6 MPa,大幅降低了充填成本。赵鑫等人^[42]将辽宁某含氰金尾矿通过低温焙烧进行脱氰处理,除氰达标的金尾矿作为骨料来制备膏体胶

结充填材料。研究发现:(1)用于稳定性良好的采空区的配比方案灰砂质量比1:10,料浆质量浓度为72%,骨料组成为金尾矿;(2)用于稳定性较差的采空区的配比方案灰砂质量比1:9,料浆质量浓度为70.92%,骨料组成为 $m(\text{炉底渣}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{金尾矿})=20\%:10\%:70\%$;(3)用于稳定性不良的采空区的配比方案灰砂质量比1:9,料浆质量浓度72.99%,骨料组成为 $m(\text{炉底渣}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{金尾矿})=60\%:10\%:30\%$ 。该方法减少了含氰金尾矿的危害,并通过FLAC^{3D}数值模拟软件建立充填开采模型,确定了不同稳定性采矿区的充填材料配比方案。为其他选金矿山采空区井下充填提供了可靠借鉴。

目前金尾矿充填技术主要以膏体充填为主,但是对充填体力学性能及其他性能的影响因素较多,其中包括固化胶结材料(剂)的种类及掺加量、尾砂颗粒的细度、充填料浆的搅拌时间、充填料浆的浓度等。在实际矿山充填中,要对以上因素加以控制,在降低水泥用量的条件下,满足充填对充填体力学性能和其他性能要求。

4 制备建筑材料

金尾矿中含有大量可利用的硅酸盐矿物和碳酸盐矿物^[43],其成分与广泛应用的建材原料极为相近。因此可作为生产混凝土、砖、陶粒和发泡陶瓷等的原材料,实现对金尾矿的最大化利用。

4.1 混凝土

4.1.1 混凝土

混凝土是由凝胶材料、骨料和水按适当比例配制,再经过一定时间硬化而成的复合材料。大多金尾矿由产量80%以上的硅铝氧化物组成,与建筑材料成分相似。因此可以作为石英砂的替代物,或者胶凝材料用于混凝土生产。Ahmed等^[44]用金尾矿替代80%质量分数的石英砂来制备超高性能混凝土,发现其性能相当或高于全部用石英砂作为骨料制得的超高性能混凝土的抗压强度,具有显著的环境效益和经济效益。金尾矿粒度小、表面粗糙,尾矿掺量越高则混凝土流动性越低,因而金尾矿直接代替砂子用于制备普通混凝土的应用范围较窄。刘竞怡^[45]采用改性剂SA对金尾矿表面涂覆后制备出满足不同强度要求的无粗集料混凝土材料,为实现金尾矿大量应用于混凝土提供了新的发展思路。郜志海等^[46]通过向金尾矿中添加石灰石($m(\text{金尾矿}):m(\text{石灰石})=50\%:50\%$)来煅烧出富含高贝利特相的改性金尾矿用于混凝土掺合料。结果表明:用该混凝土掺合料配制的C80高性能混凝土耐腐蚀性更强;耐久性、抗渗性和抗冻性等性能与普通C80混凝土相近。王晓东^[47]通过向金尾矿中添

加质量分数为2%的钢纤维制备的活性粉末混凝土,其抗压强度为182 MPa,抗折强度大于30.5 MPa,不仅可以大量应用于工程建设,而且降低了活性粉末混凝土的成本。

虽然金尾矿可替代部分水泥作为混凝土的辅助胶凝材料,但由于金尾矿结晶度高,反应活性低,导致混凝土活性不足,因此对其进行处理以激发其火山灰活性,对提升混凝土性能尤为关键^[48]。常见的活化方法有高温活化、化学活化、机械活化和复合活化等技术^[49-50]。付万长等^[41]通过对金尾矿进行化学激发和热激发,以提高其活性。发现当复掺激发剂即氢氧化钙与硅酸钠复掺总量占金尾矿质量1%~2%,热处理温度450℃时,可形成较多活性指数达92%~93%的无定形矿物。陈烈^[51]对某金尾矿采用机械活化和热活化的方式进行活化,得出活化后金尾矿胶凝材料最佳的质量配比为活化 $m(\text{金尾矿}):m(\text{水泥熟料}):m(\text{矿渣}):m(\text{脱硫石膏})=27\%:37\%:27\%:9\%$,该配比制备满足工程应用要求的C40混凝土材料,其工作性能和耐久性卓越。陈炳江^[52]采用机械—化学—热耦合活化的方法,通过正交试验和响应面优化试验来确定金尾矿的最佳活化工艺,金尾矿中添加质量分数为8%的氧化钙混合研磨60 min后在600℃高温下煅烧60 min。采用活化后的金尾矿粉作为混凝土的辅助胶凝材料,在C40混凝土中掺加质量分数40%以内的耦合活化的金尾矿和C60混凝土中掺加质量分数60%以内的耦合活化的金尾矿的复掺的胶凝材料均可提高混凝土的抗冻性和抗侵蚀性,且混凝土耐久性良好。

大部分金尾矿粒度偏小,虽然无法大量替代石英砂作为混凝土细集料,但通过活化替代部分水泥作为胶凝材料,制备不同强度的混凝土,从而实现金尾矿的二次资源化利用,潜在利用价值巨大。金尾矿制备混凝土的关键是对其进行活化,活化后的金尾矿的“微集料效应”与“火山灰效应”可以在一定程度上增强混凝土强度^[48]。

4.1.2 加气混凝土

加气混凝土是以水泥、石灰、砂、粉煤灰、矿渣、发气剂、气泡稳定剂和调节剂等为主要原料制造的多孔混凝土制品。相比于普通混凝土,具有轻质、保温、隔热等特点^[53-54],且能耗低。作为一种节能建筑材料,加气混凝土可以加工成板材、砌块和保温制品等墙体材料,发展前景广阔。

由于沂南金矿尾矿的SiO₂含量较低,杜辉^[55]用磨细天然砂和粉煤灰粉取代部分沂南低硅金矿尾矿来提高加气混凝土的性能,发现:用磨细天然砂部分取代低硅尾矿时,可生产出干密度等级为B07、抗压强度达4.8 MPa的低硅尾矿加气混凝土;用粉煤灰部分

取代低硅尾矿时,可生产出干密度等级为 B06、抗压强度达 3.3 MPa 的低硅尾矿加气混凝土。该方法利废率高,成本低,有巨大的经济效益和环境效益,且为低硅金尾矿资源化利用提供了新思路。陈鳌聪等^[56]通过利用脱硫后的金尾矿为原料,在单因素试验的基础上获得制备加气混凝土的最优质量配合比为 $m(\text{脱硫金尾矿}):m(\text{水泥}):m(\text{石灰}):m(\text{石膏})=55\%:15\%:27\%:3\%$;水料比 0.57,发现所制备的加气混凝土性能符合国家标准 GB/T 11968—2020 规定的 A5.0 B06 级的技术要求。陈伟等人^[57]以山东招远金矿的金尾矿为主要原料,通过添加石膏调节加气混凝土的凝结时间、提高坯体前期强度,发现当钙硅比为 0.7 时有利于托贝莫来石晶体的形成,加气混凝土制品强度高。许辉^[58]采用压缩空气物理发泡和涡轮搅拌混泡的方法对混凝土加气,用金尾矿取代硅酸盐水泥用量的 15% 时制出的加气混凝土 28 d 抗压强度为 1.4 MPa,导热系数为 0.119 W/(m·K),强度和导热系数

均满足干密度为 A05 级的要求,提出了金尾矿轻质加气混凝土实际应用于填充层的新思路。

利用金尾矿制备加气混凝土技术逐渐成熟,它的发展将为解决金尾矿堆积提供了一种新途径。但加气混凝土制品的生产和应用问题以及加气混凝土砌体裂纹等问题仍制约着加气混凝土制品的发展。

4.2 砖

4.2.1 烧结砖

烧结砖是指坯体成型后经高温焙烧而制得的具有一定颜色、致密坚硬的砖。由于具有价格便宜、建筑成本低、综合性能好等优点,烧结砖在建材领域被广泛应用^[59]。然而,制备烧结砖消耗了大量的黏土,不符合节约土地资源与环保的要求。因而,研究人员开始研究黏土的替代产物,以金尾矿为原料来制备烧结砖不仅有利于保护环境,而且节约土地资源,具有显著的经济效益^[60],具体如表 2 所示。

表 2 金尾矿制砖特点

Table 2 Characteristics of bricks prepared from gold tailings

产品名称	原料配比 (质量比)	最优生产条件	强度等级	特点	参考文献
烧结普通砖	$m(\text{金尾矿}):m(\text{泥炭质页岩})=75\%:25\%$	成型水分 16%; 成型压力 2.5 MPa; 烧成温度 1 050 ℃; 烧成周期 26 h	MU10	塑性指数好、烧成线收缩小	[61]
烧结空心砖	$m(\text{金尾矿}):m(\text{页岩})=40\%:60\%$	成型水分 17%; 成型压力 3.0 MPa; 烧成温度 980 ℃; 烧成周期 30 h	MU15	质量轻、产品抗压强度好、合格率高	[62]
烧结普通砖	金尾矿 100%	成型水分 21%; 烧成温度 1 050 ℃; 烧成周期/	MU30	尾矿利用率高、强度高	[63]
烧结普通砖	$m(\text{金尾矿}):m(\text{页岩})=90\%:10\%$	成型水分 10%; 烧成温度 1 050 ℃	MU30	尾矿利用率较高、强度高	[64]
烧结普通砖	金尾矿 100%	成型水分 9%; 成型压力 15 MPa; 烧成温度 1 050 ℃; 烧成周期 1 h	MU10	尾矿利用率高、产品合格率高	[65]
烧结普通砖	$m(\text{金尾矿}):m(\text{黏土})=65.91\%:34.09\%$	成型水分 24.56%; 烧成温度 1 030 ℃; 烧成周期 1.75 h	MU20	尾矿利用率较高、强度较高	[66]

20 世纪 90 年代,邵力等人^[61]探索了金尾矿制备普通烧结砖的可能性,发现当金尾矿与泥炭质页岩质量比例为 75%:25% 时,可制得烧结普通砖,为我国金尾矿资源化生产提供了新思路。在此基础上,晏拥华等^[62]以山东省某金矿的金尾矿作为研究对象,发现金尾矿用量 40% 时,所制烧结砖的抗压强度 25 MPa、饱和系数 0.7、吸水率小于 16%。彭建军等^[63]以白云石质金尾矿,在 1 000~1 050 ℃ 烧结温度下制备出抗压强度大于 30 MPa、吸水率约 20% 的烧结砖。贺深阳等^[64]在金尾矿质量掺量为 60%~90% 范围内,分析了烧结温度 900~1 050 ℃ 对烧结砖性能的影响。杨永刚等^[65]以沂南某金尾矿为研究对象,认为单独用细金尾矿制备烧结砖的最佳工艺为:成型压力 15 MPa,成型水分 9%,干燥后坯体含水率 1%,烧结温度 1 050 ℃,保温时间 1 h,且该产品可满足金尾矿完全资源化利

用,符合国家的环保和可持续发展战略要求。庄孙宁等^[66]以云南某金尾矿与黏土为原料,借助响应面法来确定最佳焙烧参数:即 $m(\text{金尾矿}):m(\text{黏土})=65.91\%:34.09\%$;在 1 030 ℃ 焙烧 105 min。烧制的金尾矿烧结砖的抗压强度为 22.73 MPa,吸水率为 13.52%。

金尾矿制备烧结砖以尾矿为主要原料掺加黏土或页岩制成砖坯,在 1 000 ℃ 左右高温下烧结使其内部生成一系列物理化学反应,形成致密的烧结砖。该过程需要在烧结窑中完成,生产过程的能耗较高,因此探索能耗低的烧结工艺是后期研究重点。

4.2.2 免烧砖

与烧结砖不同,免烧砖是以粉煤灰、煤渣、煤矸石等为原料,不经高温焙烧,而按照成品的要求和标准添加一定的助凝剂或化学药剂使其湿度和粒度达

标,力学性质和强化程度达到一定要求的成型熟料^[67]。袁健博^[68]以金尾矿和围岩为主要原料 [$m(\text{金尾矿}):m(\text{围岩})=45\%:30\%$]通过干法养护制备出 28 d 抗压强度为 25.63 MPa 的免烧砖。该配比大量使用了金尾矿和围岩,减少了水泥用量,具有显著的经济效益。汪宗文等^[69]以金尾矿为主要原料来制备免烧砖,发现当 K1 胶结材料与金尾矿质量比例为 1:6,拌合料用水质量占 10%,在 10 MPa 下液压成型免烧砖 28 d 抗压强度最高。

烧砖需要高能耗、热耗的烧结窑,成本较高且环境不友好。与之相比,免烧砖原料经过搅拌后只需自然养护,工艺简单易行,流水作业,一次压制成型,免烧免蒸,节约大量能源。因此,免烧砖的规模化生产是建材产品绿色可持续发展的重要方向之一。

4.3 陶粒

陶粒是主要是以黏土、页岩、污泥、工业废料等为原料,掺和少量外加剂,经造粒成球在高温下焙烧所制得的颗粒状陶质物^[70]。其表面粗糙而坚硬,外壳呈陶质或致密的釉质,内部具有封闭式细蜂窝状微孔结构^[71]。作为一种优质的轻集料,可以部分或全部取代普通砂石配制陶粒混凝土,在建筑、环保、冶金、化工、石油、农业等部门有着广泛用途^[72]。随着天然砂石资源约束的日益趋紧以及大宗固体废弃物处理压力的增大,陶粒等轻骨料因具有环保利废、轻质高强

等优势而重新引起了人们的重视^[73],其生产原料也由天然黏土、页岩等不可再生资源转向工业尾矿、冶炼尾渣、建筑渣土等固体废弃物^[74-75]。

目前尾矿制陶粒的方法通常有烧结陶粒和免烧陶粒 2 种(见表 3)。李岩^[76]以金尾矿、黄河淤沙、氧化铝为基础配料,研究 Co_2O_3 、 Cr_2O_3 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 三种显色元素氧化物制出天蓝色、铬绿色、暗紫红色三种彩色陶粒的最优方案。Park 等^[77]以金尾矿、赤泥和石灰石为原料,采用高温工艺制备陶粒,而后借助 SEM、XRD 等方法,分析了样品的物相组成和微观形貌变化。张大龙等^[78]通过添加水泥发泡剂和水泥泡沫剂来制备金尾矿免烧轻质陶粒,其堆积密度 490 kg/m^3 、筒压强度 1.55 MPa、1 h 吸水率 1.97%,为金尾矿制备免烧陶粒提供了一定的参考价值。在此基础上,段美学等^[79]发现当 $m(\text{金尾矿}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{煤粉})=60\%:40\%:10\%$;原料在 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 预热 1 h 后升温至 $1\text{ }150\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧 2 h 制得的陶粒综合性能最好。闫传霖^[80]在 $1\text{ }155\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧 2 h 制备得到符合轻集料国家标准的金尾矿烧结陶粒。孙旭东等^[81]以高温氯化挥发法处理后的氰化金尾矿为主要原料,制备出氰化金尾矿利用率为 75% 的烧结陶粒。试验的最佳工艺条件为 $m(\text{氰化金尾矿}):m(\text{膨润土}):m(\text{钠长石}):m(\text{煤粉}):m(\text{氯化钙})=63\%:7\%:11\%:14\%:5\%$;原料在 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 预热 30 min 后升温至 $1\text{ }170\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧 40 min。烧制得到的陶粒堆积密度

表 3 金尾矿制备陶粒
Table 3 Preparation of ceramide from gold tailings

产品名称	原料配比 (质量比)	最优生产条件	产品性能	产品特点	参考文献
彩色陶粒	天蓝色陶粒的最佳配比为: $m(\text{Co}_2\text{O}_3):m(\text{MgO}):m(\text{ZnO})=3:8:6$, 煤粉添加量为 2%	预热温度 $500\text{ }^\circ\text{C}$, 预热时间 15 min, 焙烧温度 $1\text{ }270\text{ }^\circ\text{C}$, 焙烧时间 25 min	堆积密度 704 kg/m^3 , 表观密度 1421 kg/m^3 , 1 h 吸水率 7.5%, 筒压强度 17.8 MPa		
	金尾矿: 黄河淤沙: 氧化铝=73.86%: 3.99%: 22.15% 铬绿色陶粒的最佳配比为: $m(\text{Cr}_2\text{O}_3):m(\text{MgO}):m(\text{ZnO})=5:8:0$, 煤粉添加量为 2%	预热温度 $500\text{ }^\circ\text{C}$, 预热时间 15 min, 焙烧温度 $1\text{ }150\text{ }^\circ\text{C}$, 焙烧时间 25 min	堆积密度 714 kg/m^3 , 表观密度 1451 kg/m^3 , 1 h 吸水率 4.5%, 筒压强度 13.4 MPa	尾矿利用率较高、陶粒强度高	[76]
	暗紫红色陶粒的最佳配比为: $m(\text{Cr}_2\text{O}_3):m(\text{SnO}_2):m(\text{CaCO}_3):m(\text{H}_3\text{BO}_3)=1:15:12:3$, 煤粉添加量为 2%	预热温度 $500\text{ }^\circ\text{C}$, 预热时间 15 min, 焙烧温度 $1\text{ }140\text{ }^\circ\text{C}$, 焙烧时间 20 min	堆积密度 934 kg/m^3 , 表观密度 1954 kg/m^3 , 1 h 吸水率 8.5%, 筒压强度 14.6 MPa		
免烧轻质陶粒	$m(\text{金尾矿}):m(42.5\text{ 水泥}):m(\text{水泥发泡剂与})=49.5\%:49.5\%:1\%$	压力浇注成球, 自然环境下喷水养护 1 d, 在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的蒸汽中养护 20 h, 丙烯酸防水涂料中浸渍	堆积密度 512 kg/m^3 , 表观密度 931 kg/m^3 , 1 h 吸水率 2.35%, 筒压强度 2.184 MPa	产品密度低、生产低碳低能耗	[78]
烧结陶粒	$m(\text{金尾矿}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{煤粉})=55.55\%:39.39\%:5.05\%$	预热温度 $450\text{ }^\circ\text{C}$, 预热时间 60 min, 焙烧温度 $1\text{ }155\text{ }^\circ\text{C}$, 焙烧时间 120 min,	堆积密度 856 kg/m^3 , 表观密度 1632 kg/m^3 , 1 h 吸水率 5.2%, 筒压强度 5.95 MPa	尾矿利用率较高、陶粒强度较高	[80]
烧结陶粒	$m(\text{金氰化尾矿}):m(\text{膨润土}):m(\text{钠长石}):m(\text{煤粉}):m(\text{CaCl}_2)=63\%:7\%:11\%:14\%:5\%$	预热温度 $450\text{ }^\circ\text{C}$, 预热时间 30 min, 在焙烧温度 $1\text{ }170\text{ }^\circ\text{C}$, 焙烧时间 40 min	堆积密度 642.93 kg/m^3 , 1 h 吸水率 9.45%	产品密度低、吸水率高	[81]

为 642.93 kg/m³、1 h 吸水率为 9.45%，金、银、铜、铅和锌等金属挥发率分别达到 83.02%、65.13%、75.89%、90.65% 和 85.34%。该研究为金尾矿的建材化应用提供了重要的参考。

烧结陶粒性能优异，但需要对其工艺进行改进，以降低成本与能耗。与烧结陶粒相比，免烧陶粒的工艺能耗低、投资小，但强度低，膨胀系数小，其研究刚刚起步。

4.4 发泡陶瓷

发泡陶瓷以尾矿、长石、石英和黏土等非金属矿物为主要原料，添加特殊的发泡剂，经高温烧制而成的高气孔率硅酸盐陶瓷材料^[82]。发泡陶瓷具有轻质高强、防火阻燃、保温隔热、防水防潮、隔音降噪等优良性能，兼具施工快速整洁、可循环利用的特点。发泡陶瓷作为一种新型绿色环保建筑材料主要应用于建筑物保温墙体、内外墙装饰等领域^[83]。

王亚婕^[84]以金尾矿、铝矾土、煤矸石、轻烧镁粉及炭为原料，在 1 990 °C 保温 1 h 烧制出综合性能优良的发泡陶瓷，为金尾矿的高附加值利用提供了新途径。在此基础上，在发泡温度 1 050 °C 时，朱建平等^[85]烧制出真气孔率 75%、容重 725 kg/m³、强度 4.75 MPa 的发泡陶瓷。王志明等^[86]以金尾矿和碱渣为主要原料制备出满足《JGT 506—2016 尾砂微晶发泡板材及砌块》中 Md 4 产品性能指标要求的保温发泡陶瓷。

金尾矿生产发泡陶瓷的工艺过程中，烧结温度对其性能具有重要影响，温度过低时 SiC 分解生成气体量不足，气孔较小且分布紧密，真气孔率低，温度过高则会导致坯体内部生成大气孔。除此之外，尾矿掺量及粒径也对发泡陶瓷性能有一定影响。

5 结语

金尾矿具有较大的资源化利用价值，包括综合回收其中有价金属元素与非金属矿物，金尾矿制备充填材料、混凝土、烧结砖、陶粒、泡沫陶瓷等建筑材料，应用前景十分广阔。

(1) 金尾矿中金属元素的回收大多需要经过预处理，选金中浸出药剂毒性较大，宜关注环保药剂使用相关研究，其他金属和非金属矿物回收中应增强选择性更强的捕收剂研究，提高精矿的品位和回收率。

(2) 金尾矿用于采区充填是大规模消纳金尾矿的主要途径之一，由于高浓度尾矿浆体黏度大、输送困难、极易堵管，制约了充填工艺的应用和推广。后期应增强外加剂在膏体充填中应用的适应性研究，提高膏体充填的应用范围。

(3) 金尾矿的成分与广泛应用的建材原料极为相近。在用于混凝土材料生产上应增强其活化技术的

研究，提高混凝土强度。加气混凝土的生产上应关注解决其砌体裂纹的问题。制备烧结砖和烧结陶粒由于能耗高制约了其发展，探索低能耗的工艺成为重点。目前免烧砖和免烧陶粒的相关研究较少，后期应成为金尾矿制备建筑材料的研究重点。

(4) 金尾矿生产泡沫陶瓷等高附加值利用是当前的研究热点。重点在于确保产品性能的同时，通过降低成本，节约能耗，加深理论研究和实验，加快实际生产投入，并在实践中不断进行工艺的简化和原料的优化。同时，应加强选金尾矿综合利用相关标准和规范的完善，推动产品的市场化和规模化应用。

(5) 相比于其他金属矿种，金矿生产存在尾矿产率高的特性，如何实现其高附加值且大规模消纳必是其资源化利用的关键研究方向。

参考文献：

- [1] 佚名. 全国矿产资源储量统计表[R]. 北京：自然资源部，2021.
YI M. Statistical table of national mineral resources reserves[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2021.
- [2] 佚名. 2022年中国尾矿综合利用行业全景分析[Z]. 智研咨询 (www. chyxx. com.), 2022.
ANONYMITY. Panoramic analysis of the comprehensive utilization of Chinese tailings industry in 2022[Z]. Zhiyan Consulting (www. chyxx. com.), 2022.
- [3] 陈兰兰, 卢东方, 王毓华. 黄金矿山尾矿的组成, 危害及资源化利用技术[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 161-169.
CHEN L L, LU D F, WANG M H. Composition, harm and resource utilization technology of gold mine tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(5): 161-169.
- [4] 迟崇哲, 翟菊彬, 兰馨辉, 等. 黄金尾矿综合利用分析[J]. 黄金, 2022, 43(2): 100-103.
CHI C Z, ZHAI J B, LAN X H, et al. Analysis of comprehensive utilization of gold tailings[J]. Gold, 2022, 43(2): 100-103.
- [5] 黄宗祥, 徐伟. 秀山县生态环境问题及对策措施[J]. 三峡环境与生态, 2009, 2(6): 1-3.
HUANG Z X, XU W. The ecological environment problems of Xiushan country and the countermeasures[J]. Environment and ecology of the Three Gorges, 2009, 2(6): 1-3.
- [6] WANG P, SUN Z H, HU Y, et al. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133893.
- [7] HUANG Z, JIANG L, WU P, et al. Leaching characteristics of heavy metals in tailings and their simultaneous immobilization with triethylenetetramine functioned montmorillonite (TETA-Mt) against simulated acid rain[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115236.
- [8] 童雄, 吕昊子. 近年来国外尾矿再选与治理的研究[J]. 矿产综合利用, 2014, 186(2): 20-24.
TONG X, LV H Z. Research on reconcentration and disposal of tailings abroad in recent years[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014, 186(2): 20-24.
- [9] SARI M, YILMAZ E, KASAP T. Long-term ageing characteristics of cemented paste backfill: Usability of sand as a partial substitute of hazardous tailings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 401: 136723.

- [10] LICSKOI, LOIS L, SZEKENYI G. Tailings as a source of environmental pollution[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(10/11): 333-336.
- [11] YI Z, SUN H, WEI X, et al. Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2009, 16(3): 355-358.
- [12] 佚名. 应急管理部发布《防范化解尾矿安全风险工作方案》[J]. *江西建材*, 2020, 255(4): 1-3.
YI M. The ministry of emergency management issued the work plan on preventing and resolving tailings pond safety risks[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2020, 255(4): 1-3.
- [13] 孙旭东, 刘晓敏, 龚裕, 等. 黄金尾矿建材化利用的研究现状及展望[J]. *金属矿山*, 2020, 525(3): 12-22.
SUN X D, LIU X M, GONG Y, et al. Research status and prospects for the utilization of gold tailings as building materials[J]. *Metal Mine*, 2020, 525(3): 12-22.
- [14] WANG J, XING Y, LI P, et al. Chemically-assisted phytoextraction from metal (loid) s-polluted soil at a typical carlin-type gold mining area in southwest China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189: 612-619.
- [15] MAO J W, ZHOU Y M, LIU H. Metallogenic setting and ore genetic model for the Beiya porphyry-skarn polymetallic Au orefield, western Yunnan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 21-34.
- [16] 胡术刚, 尚修宇, 初慧. 金矿尾矿综合利用途径研究与展望[J]. *世界环境*, 2018, 174(5): 26-30.
HU S G, SHANG X Y, CHU H. Study and prospects of the approach of comprehensive utilization of gold tailings[J]. *World environment*, 2018, 174(5): 26-30.
- [17] 金英豪, 邢万芳, 姚香. 黄金尾矿综合利用技术[J]. *有色矿冶*, 2006, 22(5): 16-19.
JIN Y H, XING W F, YAO X. Technology of comprehensive utilization of gold mining[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2006, 22(5): 16-19.
- [18] EDRAKI M, BAUMGARTL T, MANLAPIG E, et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 411-420.
- [19] 闫晓慧, 李桂春, 孟齐. 金矿中提金技术的研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(11): 2719-2723.
YAN X H, LI J C, MENG Q. Research progress of gold extraction technology in gold deposits[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(11): 2719-2723.
- [20] AMMAR M, ABD EL-HALIM S, SHARADA H, et al. Study on the interactions of two models of enzymes as eco-friendly depressants in flotation separation of apatite from hematite[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 601: 154223.
- [21] GAO Z, WANG Q, WU Y, et al. Quantum chemistry assisted screening of zircon flotation collectors[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 189: 107892.
- [22] FARIS N, RAM R, TARDIO J, et al. Application of ferrous pyrometallurgy to the beneficiation of rare earth bearing iron ores—A review[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 110: 20-30.
- [23] 李日升, 翟旭东, 冯玉怀, 等. 从某金尾矿中回收金的探讨性试验[J]. *金属矿山*, 2017, 493(7): 190-192.
LI R S, ZHAI X D, FEGN Y H, et al. Experiment on recovery gold from a gold tailings resources[J]. *Metal Mine*, 2017, 493(7): 190-192.
- [24] 段明铭, 王苹, 杨鹏, 等. 甘肃某金矿浮选尾矿新型环保浸金剂浸出试验研究[J]. *黄金*, 2021, 42(6): 74-77.
- DUAN M M, WANG P, YANG P, et al. Experiment study on the leaching of flotation tailings from a gold mine in Gansu with a new type environment-friendly gold leaching reagent[J]. *Gold*, 2021, 42(6): 74-77.
- [25] 杨玮, 叶金秋, 龙涛, 等. 选冶联合回收某高硫黄金尾矿中金的试验研究[J]. *黄金科学技术*, 2023, 31(1): 113-122.
YANG W, YE J Q, LONG T, et al. Experimental study on gold recovery from a high-sulfur gold tailings by beneficiation-metallurgy combination[J]. *Gold Science and Technology*, 2023, 31(1): 113-122.
- [26] 常富强, 梁献振, 李杰. 河南某金尾矿回收金试验研究[J]. *现代矿业*, 2021, 37(9): 9-11+40.
CHANG F Q, LIANG X Z, LI J. Experimental study on gold recovery from a gold tailings in He 'nan[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(9): 9-11+40.
- [27] 李骞, 董斯宇, 许瑞, 等. 金矿提金技术及其研究进展[J]. *黄金*, 2020, 41(9): 86-101.
LI Q, DONG S Y, XU R, et al. Gold extraction technology for gold ores and its research progress[J]. *Gold*, 2020, 41(9): 86-101.
- [28] 张亮, 杨卉芑, 冯安生, 等. 全球铁矿资源开发利用现状及供需分析[J]. *矿产保护与利用*, 2016, 206(6): 57-63.
ZHANG L, YANG H P, FENG A S, et al. Study on utilization and analysis of supply and demand of global iron ore resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2016, 206(6): 57-63.
- [29] 张胜广, 曹志群, 石云良. 磁化焙烧-磁选-反浮选工艺回收选金尾矿中铁的试验研究[J]. *矿冶工程*, 2012, 32(3): 44-47.
ZHANG S G, CAO Z Q, SHI Y L. Experimental study on recycling iron from gold ore tailings by magnetizing roasting-magnetic separation-reverse flotation[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2012, 32(3): 44-47.
- [30] 陈延信, 姚艳飞, 酒少武, 等. 分散态磁化焙烧—磁选回收某金尾矿中的铁[J]. *金属矿山*, 2012, 428(2): 63-66.
CHEN Y X, YAO Y F, JIU S W, et al. Recovery of iron from gold mine tailings by decentralized magnetization roasting-magnetic separation[J]. *Metal Mine*, 2012, 428(2): 63-66.
- [31] 杨振兴, 于鸿宾, 郝福来, 等. 某氰化尾渣综合回收铜铅选矿试验研究[J]. *黄金*, 2021, 42(4): 76-79+83.
YANG Z X, YU H B, HAO F L, et al. Experimental study on comprehensive recovery of copper and lead from cyanidation tailings[J]. *Gold*, 2021, 42(4): 76-79+83.
- [32] 周新民, 徐靖, 宋翔宇. 灵宝某金矿白钨尾矿综合回收试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2011, 175,176(Z1): 83-87.
ZHOU X M, XU J, SONG X Y. Comprehensive recovery of scheelite from the gold tailings in Lingbao of He'nan Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2011, 175,176(Z1): 83-87.
- [33] 王英硕, 孙体昌, 郭晓霜, 等. 有色金属尾矿综合利用的方法比较[J]. *现代矿业*, 2019, 35(11): 20-24.
WANG Y S, SUN T C, GUO X S, et al. Comparison of comprehensive utilization methods of nonferrous metal tailings[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(11): 20-24.
- [34] 王江飞. 金浮选尾矿提取石英试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2015, 34(6): 36-40.
WANG J F. Experimental research on extracting quartz from gold tailings[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2015, 34(6): 36-40.
- [35] 魏转花, 赖伟强, 黄思捷. 某金尾矿综合回收长石试验研究[J]. *非金属矿*, 2014, 37(2): 69-71.
WEI Z H, LAI W Q, HUANG S J. Research on comprehensive

- recovery of feldspar from gold tailings[J]. *Non-metallic Mines*, 2014, 37(2): 69-71.
- [36] 黄曼, 林海, 刘国富, 等. 从金矿浮选尾矿中回收绢云母的试验研究[J]. *黄金*, 2006, 67(3): 38-40.
- HAUGN M, LIN H, LIU G F, et al. Study on recovery of sericite from the tailing of gold flotation[J]. *Gold*, 2006, 67(3): 38-40.
- [37] 刘玉. 山东黄金集团生产矿山充填技术现状与展望[J]. *中国金属通报*, 2019, 1003(4): 40-41.
- LIU Y. Current situations and outlook of filling technology in productive mines of Shandong Gold Corp[J]. *China Metal Bulletin*, 2019, 1003(4): 40-41.
- [38] 谷岩, 南世卿, 李富平. 矿渣胶结材料充填体强度确定及配比优化[J]. *金属矿山*, 2014, 453(4): 10-14.
- GU Y, NAN S Q, LI F P. Determination of the filling body strength and the ratio optimization made by slag cementitious materials[J]. *Metal Mine*, 2014, 453(4): 10-14.
- [39] 卫亚儒, 王瑞廷, 孙峰, 等. 外加剂在我国尾矿充填中的研究及应用进展[J]. *中国钨业*, 2021, 45(5): 1-5.
- WEI Y R, WANG R T, SUN G, et al. Research and application progress of admixtures in tailings filling in China[J]. *China Molybdenum Industry*, 2021, 45(5): 1-5.
- [40] 赵英良, 邢军, 刘辉, 等. 蚕庄金矿尾矿碱熔活化制备充填胶凝材料[J]. *有色金属工程*, 2017, 7(6): 80-85.
- ZHAO Y L, XING J, LIU H, et al. Preparation of binding materials for backfilling using alkali fused gold mine tailings[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2017, 7(6): 80-85.
- [41] 付万长, 蔡基伟, 史俊礼, 等. 化学与热处理法对金尾矿胶凝活性的激发[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8): 2542-2548.
- FU W C, CAI J W, SHI J L, et al. Chemical and thermal activation of reactivity of gold tailings as a supplementary cementitious material[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(8): 2542-2548.
- [42] 赵鑫. 黄金尾矿基井下胶结充填材料力学性质研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- ZHAO X. Study on mechanical property of gold-tailing-based underground cemented filling material[D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2021.
- [43] 李礼, 谢超, 冯一鸣. 金尾矿综合利用技术研究与应用进展[J]. *资源开发与市场*, 2012, 28(9): 816-818+776.
- LI L, XIE C, FENG Y M. Overview of gold mine tailings comprehensive utilization technology[J]. *Resources Development & Market*, 2012, 28(9): 816-818+776.
- [44] AHMED T, ELCHALAKANI M, BASARIR H, et al. Development of ECO-UHPC utilizing gold mine tailings as quartz sand alternative[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021(4): 100176.
- [45] 刘竞怡, 孙志华, 温久然, 等. 金尾矿砂作为混凝土集料的物化性质及其改性试验[J]. *金属矿山*, 2021, 539(5): 211-220.
- LIU J Y, SUN Z H, WEN J R, et al. Physical and chemical properties of gold tailing sand as concrete aggregate and its modification test[J]. *Metal Mine*, 2021, 539(5): 211-220.
- [46] 郝志海, 肖国先, 韩静云. 黄金尾矿制高贝利特相掺合料用于C80混凝土的耐久性研究[J]. *混凝土*, 2009, 241(11): 51-53+57.
- GAO Z H, XIAO G X, HAN J Y. Research on durability of C80 concrete with belite-rich admixture powder from gold mine tailings[J]. *Concrete*, 2009, 241(11): 51-53+57.
- [47] 王晓东. 金尾矿在活性粉末混凝土中的应用研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- WANG X D. Application of gold tailing in the reactive powder concrete[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2017.
- [48] 申艳军, 白志鹏, 郝建帅, 等. 尾矿制备混凝土研究进展与利用现状分析[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(3): 845-857+876.
- SHEN Y J, BAI Z P, HAO J S, et al. Research progress and utilization status analysis of concrete prepared by tailings[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(3): 845-857+876.
- [49] CHEN B J, PANG L F, ZHAO Y M, et al. Effect of activated gold tailings replacing fly ash on the properties of cement-based grouting material[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(5): 4022066.
- [50] ALLAHVERDI A, MALEKI A, MAHINROOSTA M. Chemical activation of slag-blended Portland cement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 18: 76-83.
- [51] 陈烈. 金尾矿胶凝材料的制备及其固氯机理研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- CHEN L. Study on preparation of cementitious materials with gold tailings and the mechanism of curing chlorine ion[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [52] 陈炳江. 金尾矿粉活化及其对混凝土性能的影响[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- CHEN B J. Activation of gold tail powder and its effect on concrete properties [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022.
- [53] 寇华榕. 综合利用黄金尾矿生产加气混凝土砌块[J]. *建筑技术开发*, 2011, 38(2): 7-10.
- KOU H R. Production of aerated concrete block by comprehensive utilization of gold tailings[J]. *Building Technology Development*, 2011, 38(2): 7-10.
- [54] CAI L X, MA B G, LI X G, et al. Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (AAC) containing iron tailings: Effect of content and fineness[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 128(8): 361-372.
- [55] 杜辉. 利用沂南金矿尾矿制作加气混凝土的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.
- DU H. Experimental study on autoclaved aerated concrete by using Yinan gold mine tailings[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009.
- [56] 陈鳌聪. 利用金尾矿生产加气混凝土的性能优化试验研究[J]. *建材世界*, 2021, 42(6): 24-27.
- CHEN A C. Experimental study on performance optimization of aerated concrete made by gold tailings[J]. *The World of Building Materials*, 2021, 42(6): 24-27.
- [57] 陈伟, 倪文, 李倩, 等. 石膏掺量和钙硅比对金尾矿加气混凝土性能的影响[J]. *金属矿山*, 2013, 443(5): 160-163.
- CHEN W, NI W, LI Q, et al. Effects of gypsum content and calcium-silicon ratio on properties of aerated concrete with gold tailings[J]. *Metal Mine*, 2013, 443(5): 160-163.
- [58] 许辉. 黄金尾矿在干混砌筑砂浆和泡沫混凝土中的资源化应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- XU H. Resource utilization of gold mine tailing on dry-mixed mortar and foamed concrete[D]. Xi'an: Xi'an Architecture and Technology University, 2017.
- [59] 祝志雄, 解晓宁, 应晓猛, 等. 砂石矿山固废制备烧结砖试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(9): 123-126.
- ZHU Z X, XIE X N, YING X M, et al. Experimental study on preparation of sintered brick from solid waste of sandstone mine[J]. *New building Materials*, 2022, 49(9): 123-126.
- [60] 段旭晨. 黄金尾矿制备建筑材料的工艺及性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- DUAN X C. Research on preparation technologies and properties of

- building material from gold tailings[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [61] 邵力,何所为,权胜民,等.利用金尾矿生产烧结普通砖的研究[J].*砖瓦*,1997,58(1):34-37.
SHAO L, HE S W, QUAN S M, et al. Research on production of sintered ordinary brick from gold tailings[J]. *Brick and Tile*, 1997, 58(1): 34-37.
- [62] 晏拥华,梁嘉琪,任敏.利用金尾矿渣生产烧结空心砖的试验[J].*砖瓦*,2002,77(5):18-21.
YAN Y H, LIANG J Q, REN M. Experiment on production of sintered hollow brick with gold tail slag[J]. *Brick and Tile*, 2002, 77(5): 18-21.
- [63] 彭建军,贺深阳,刘恒波,等.白云石质金尾矿制备烧结砖的研究[J].*新型建筑材料*,2012,39(10):21-23.
PENG J J, HE S Y, LIU H B, et al. Research on preparation of sintered brick by dolomitic gold deposit tailings[J]. *New Building Materials*, 2012, 39(10): 21-23.
- [64] 贺深阳,宋美,彭建军,等.高掺量金尾矿烧结砖的烧结机理研究[J].*砖瓦*,2012,300(12):23-26.
HE S Y, SONG M, PENG J J, et al. Study on firing mechanism of fired brick with high addition of gold deposit tailings[J]. *Brick and Tile*, 2012, 300(12): 23-26.
- [65] 杨永刚.利用金尾矿制备烧结普通砖的试验研究[D].青岛:青岛理工大学,2010.
YANG Y G. Study on making fired common bricks with gold tailings[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [66] 庄孙宁.金矿尾矿制备烧结砖的试验研究[D].重庆:重庆大学,2019.
ZHUANG S N. Experimental study on preparation of sintered brick using gold tailings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [67] 李晓辉,陈自东,陈乐乐,等.免烧砖研究进展[J].*中国资源综合利用*,2023,41(4):67-71.
LI X H, CHEN Z D, CHEN L L, et al. Research progress in unburned bricks[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(4): 67-71.
- [68] 袁健博.赤泥/尾矿/页岩协同制备免烧建材及性能研究[D].北京:中国地质大学,2020.
YUAN J B. Collaborative preparation of unburned building materials from red mud, gold tailings and shale[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [69] 汪宗文,刘义波,赵显辉,等.金矿尾矿免烧砖的制备研究[J].*冶金与材料*,2020,40(1):24-25.
WANG Z W, LIU Y B, ZHAO X H, et al. Study on preparation of sintered brick for gold mine tailings[J]. *Metallurgy and Materials*, 2020, 40(1): 24-25.
- [70] 谭兴立,吴林森,符巩固.陶粒开发应用现状及在湖南的发展前景[J].*国土资源导刊*,1997,93(1):57-62.
TAN X L, WU L S, FU G G. The present condition of development and application of ceramic grain and its prospect in Hunan[J]. *Land & Resources Herald*, 1997, 93(1): 57-62.
- [71] 杨时元.陶粒原料性能及其找寻方向的探讨[J].*建材地质*,1997,72(4):14-19.
YANG S Y. Discussion on the properties of ceramic materials and their search direction[J]. *Building Materials Geology*, 1997, 72(4): 14-19.
- [72] 郝斐,赵大传.轻质/超轻粉煤灰陶粒的研制及陶粒膨胀机理的探讨和应用[J].*功能材料*,2010,41(S3):518-523.
CHI F, ZHAO D C. Preparation of ultra-lightweight fly ash ceramic (ULFAC), investigation and application of the bloating mechanism[J]. *Journal of Functional Materials*, 2010, 41(S3): 518-523.
- [73] FU Y, QIAO H, FENG Q, et al. Self-stabilisation of high-temperature calcined electrolytic manganese residue in mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 386: 131460.
- [74] LIU J, LI Z, ZHANG W, et al. The impact of cold-bonded artificial lightweight aggregates produced by municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) replace natural aggregates on the mechanical, microscopic and environmental properties, durability of sustainable concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130479.
- [75] CHEBOUB T, SENHADJI Y, KHELAFI H, ESCADEILLAS G et al. Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119406.
- [76] 李岩.彩色陶粒的制备及其性能研究[D].济南:济南大学,2016.
LI Y. The Preparation of colored ceramic and its performance study[D]. Jinan: University of Jinan, 2016.
- [77] PARK H, KIM S, SHIN D, et al. Production of lightweight aggregate and ceramic balls using gold tailings, red mud and limestone[C]//Symposium on Towards Materials Resource Sustainability (REWAS) held during the 145th Annual Meeting of the Minerals-Metals-and-Materials-Society (TMS). Nashville, TN, 137-143.
- [78] 北京金隅红树林环保技术有限责任公司,天津城建大学.一种黄金尾矿免烧轻质陶粒及其制备方法:CN202210512855.7[P].2022-07-29.
Beijing Jinyu Mangrove Environmental Protection Technology Co., LTD., Tianjin Chengjian University. A kind of non-burning light ceramic particle of gold tailings and its preparation method: CN202210512855.7[P]. 2022-07-29.
- [79] 段美学,闫传霖,赵蔚琳.利用金矿尾矿烧制陶粒的正交实验研究[J].*中国粉体技术*,2014,20(4):64-67.
DUAN M X, YAN C L, ZHAO W L. Orthogonal test of preparing ceramists using gold tailing[J]. *China Powder Science and Technology*, 2014, 20(4): 64-67.
- [80] 闫传霖.金尾矿焙烧陶粒的制备与性能研究[D].济南:济南大学,2014.
YAN C L. The preparation of gold tailings roasting ceramist and its performance study[D]. Ji'nan: University of Ji'nan, 2014.
- [81] 孙旭东,潘德安,龚裕,等.氧化尾渣高温氯化焙烧制备陶粒[J].*有色金属(冶炼部分)*,2020,23(6):70-79.
SUN X D, PAN D AN, GONG Y, et al. Preparation of ceramist from cyanide tailings by high-temperature chlorination roasting process[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2020, 23(6): 70-79.
- [82] HUO W L, ZHANG X Y, CHEN Y, et al. Novel mullite ceramic foams with high porosity and strength using only fly ash hollow spheres as raw material[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(4): 2035-2042.
- [83] 张留生,邱永斌.高温发泡陶瓷及其应用[J].*新型建筑材料*,2005,12(5):58-59.
ZHANG L S, QIU Y B. High temperature foamed ceramics and their application[J]. *New Building Materials*, 2005, 12(5): 58-59.
- [84] 王亚婕.金尾矿高硫选冶尾渣制备泡沫陶瓷[D].武汉:武汉理工大学,2016.
WANG Y J. Study of foam ceramic prepared from high-sulfur[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [85] 朱建平,乐红志,白荣,等.利用黄金尾矿制备发泡陶瓷的研究[J].*硅酸盐通报*,2021,40(9):2989-2997.
ZHU J P, YUE H Z, BAI R, et al. Research on preparation of foamed ceramics from gold tailings[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*,

2021, 40(9): 2989–2997.

- [86] 王志明, 渠美云, 姚耿, 等. 利用碱渣和金尾矿协同制备多孔陶瓷中孔结构和晶相的影响因素研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 65–74.

WAGN Z M, QU M Y, YAO G, et al. Influence factors of pore structure and crystal phase in preparation of porous ceramics with alkali residue and gold tailings[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 41(4): 65–74.

Research Progress on the Resource Utilization of Gold Tailings

YANG Wei^{1,2,3}, CHANG Dong^{1,2,3}, LONG Tao^{1,2,3}, DENG Sha^{1,2,3}

1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Gold and Resources in Shaanxi Province, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

3. Technology & Equipment Institute of Green Beneficiation-Metallurgy, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract: The massive accumulation of gold tailings not only occupies valuable land resources, but also has great security risks. These tailings contain high content metallic elements and non-metallic minerals, which has great recovery value and resource utilization prospect. Aiming at the resource utilization of gold tailings, the technical path and technological characteristics of recovering valuable metals such as gold, iron and lead and non-metallic minerals such as quartz, feldspar and sericite from gold tailings were described in detail. The technical scheme of activated gold tailings used as cementation material for filling mining area was analyzed. Meanwhile, the preparation of concrete, sintered brick, ceramite, foam ceramics and other building materials from gold tailings was discussed. Finally, the existing problems and research development direction of gold tailings resource utilization were reviewed.

Keywords: gold tailings; resource utilization; valuable mineral; non-metallic minerals; stope filling; building materials

引用格式: 杨玮, 常东, 龙涛, 邓莎. 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, DENG Sha. Research progress on the resource utilization of gold tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 168–178.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



作者简介:

杨玮(1971—), 男, 河南灵宝人, 西安建筑科技大学教授, 博士生导师。中国金属学会选矿分会第七、八届委员会委员, 中国有色金属学会贵金属学术委员会(CPMC)第六届委员, 陕西省金属学会理事会理事兼采矿与选矿专业委员会副主任委员, 陕西省冶金科协第五届委员会委员, 陕西省矿产资源综合利用工程技术研究中心学术委员会委员。主要研究领域有稀贵金属选冶、难处理资源选冶协同利用、选冶固废资源化及废水循环利用以及矿业经济等。在企业工作二十年后于2013年7月进入高校工作, 一直从事稀贵金属选冶、金属矿物分选技术管理和科学研究工作, 基础理论扎实, 实践工作经验丰富。主持国家自然科学基金、省部级科研项目及企业横向项目10余项, 发表学术论文50余篇, 其中SCI论文15篇, 授权发明专利6项, 获陕西省科技进步奖1项、陕西高等学校科学技术奖2项及多次行业科技奖励。



通信作者简介:

常东(1996—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 现就读于西安建筑科技大学矿物加工工程专业, 师从杨玮教授, 主要从事资源综合回收研究工作。