

工业废物制备硅酸盐水泥研究综述

雷西虎^{1,2}, 高 锋^{1,2}, 廖国安^{1,2}, 沈应墙^{1,2}, 江远锋^{1,2}

¹省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 广西 南宁

²广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁

收稿日期: 2024年1月22日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月29日

摘 要

随着我国制造业的磅礴发展, 在发展过程中产生了大量工业废物, 这些工业废物对环境和人类健康造成了严重影响, 而且工业废物的处理也面临着非常大的困难。因此, 如何将这些废弃物转化为有价值的资源成为了一个重要的研究方向。文章介绍了粉煤灰、钢渣、铁尾矿、镍铁渣、铜尾矿、金尾矿这六种工业废物在制备硅酸盐水泥方面的研究现状, 通过将 these 工业废物制备成硅酸盐水泥不仅可以极大地缓解环境压力, 而且可以实现废物利用。

关键词

硅酸盐水泥, 工业废渣, 废物利用

Research Review on the Preparation of Portland Cement from Industrial Wastes

Xihu Lei^{1,2}, Feng Gao^{1,2}, Guoan Liao^{1,2}, Yingqiang Shen^{1,2}, Yuanfeng Jiang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-Cycle Safety for Composite Structures, Nanning Guangxi

²School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

Received: Jan. 22nd, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

With the vigorous development of China's manufacturing industry, a large amount of industrial waste has been generated during the development process. These industrial wastes have caused

文章引用: 雷西虎, 高峰, 廖国安, 沈应墙, 江远锋. 工业废物制备硅酸盐水泥研究综述[J]. 材料科学, 2024, 14(3): 297-303. DOI: 10.12677/ms.2024.143035

serious impacts on the environment and human health, and the treatment of industrial wastes also faces great difficulties. Therefore, how to transform these wastes into valuable resources has become an important research direction. This paper introduces the research status of six kinds of industrial wastes, including fly ash, steel slag, iron ore tailings, iron-nickel slag, copper tailings, and gold tailings, in the preparation of Portland cement. By preparing these industrial wastes into Portland cement, it can not only greatly alleviate environmental pressure, but also realize waste utilization.

Keywords

Portland Cement, Industrial Waste Residue, Waste Utilization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国制造业的磅礴发展,大量的工业废物也随之产生,这些废物不仅造成了环境负担急剧增加,还对土壤、水源和空气质量造成了严重的污染。钢渣、铁镍渣、铜渣和铜尾矿等工业废物就是在原料提纯、加工制造和产品生产的各个阶段中产生。由于这些废物中含有大量的有毒有害物质,如果不加以妥善处理,将对环境和人类健康造成极大的危害。目前,许多工业废物的处理方式主要是填埋。然而,这种处理方式存在很大的问题。首先,工业废物填埋会占用大量土地资源,导致土地资源的浪费。其次,随着废物填埋量的不断增加,地下的压力也在不断增大,可能引发地面塌陷等地质灾害。此外,工业废物中的有毒有害物质可能会通过渗滤作用进入地下水和土壤,进而污染水源和土壤,影响农作物的生长和危及人身安全。

在资源日益紧张的背景下,废物利用和处置已经成为当今社会重要的研究方向之一,如何将废弃物转化为有价值的资源显得尤为重要。粉煤灰作为一种常见的工业废物,已经在水泥行业中得到了广泛的应用。2021年美国煤灰协会[1]报告显示,目前水泥行业已经使用了1090万吨粉煤灰来制备硅酸盐水泥。这一数据证明了工业废物开发是非常具有潜力的。许多水泥厂家和消费者也表示[2],他们希望在未来能够使用更多的粉煤灰来生产硅酸盐水泥。其他工业废物有希望像粉煤灰一样转变为可利用资源,目前,许多国家的研究人员都在积极采用工业副产品制备硅酸盐水泥或其它产品。通过工业废料二次利用这种方式可以改善硅酸盐水泥行业的环境压力。工业废物制备水泥主要分为两种方式,一种是以工业废物为原料直接制备硅酸盐水泥,具体的工艺流程如图1所示,另一种则是以其他的材料为基础,在制备熟料的基础上添加工业废物制备矿渣硅酸盐水泥,具体的工艺流程如图2所示。本文总结了粉煤灰、钢渣、铁尾矿、镍铁渣、铜尾矿、金尾矿这六种工业废物用于制备硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥的研究现状。

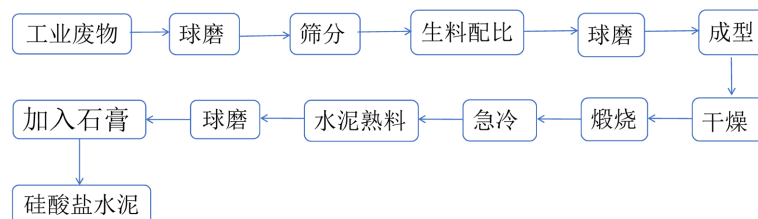


Figure 1. Process flow of preparing Portland cement from industrial wastes

图1. 工业废物制备硅酸盐水泥工艺流程

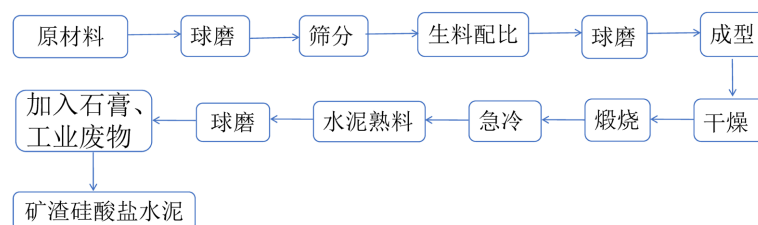


Figure 2. Process flow of preparing slag Portland cement from industrial wastes
图 2. 工业废物制备矿渣硅酸盐水泥工艺流程

2. 工业废渣制备硅酸盐水泥研究

2.1. 粉煤灰制备硅酸盐水泥研究

粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固体废物，主要由富硅和富铝的玻璃珠状铁矿物组成。结晶矿物的含量与粉煤灰冷却速度有关[3]。Darweesh [4]研究了粉煤灰进行不同掺量和不同的熟化温度对水泥熟料质量的影响。结果表明，在水泥熟料合成以后再加入 35 wt% 的粉煤灰，其水泥砂浆力学性能相较于未掺粉煤灰的水泥砂浆有所提高，28 天的抗压强度达到 80 MPa 以上，煅烧温度为 1350℃，证明利用粉煤灰制备矿渣硅酸盐水泥是可行的。而 Wu 等、Kleib 等研究者[5] [6] [7]则是直接以粉煤灰为原料制备硅酸盐水泥熟料，分别制备了铝酸盐水泥、普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥。铝酸盐水泥相较于普通硅酸盐水泥煅烧温度更低，为 1200℃，而且具有高强度、低重金属的特征，28 天强度达到了 100 MPa 以上。Kleib 以粉煤灰代替生料中的 Fe_2O_3 ，最大添加量为 12.4%，煅烧温度为 1450℃，熟料硅酸盐相发育良好，28 天强度接近 50 MPa。Li 等人[8]利用高铝粉煤灰制备了硫铝矾水泥，硫铝矾水泥相较于普通硅酸盐水泥拥有耐久性好、耐酸碱侵蚀等特点。XRD 分析表明，在 1300℃ 时可获得最佳矿物学相，28 天抗压强度为 49 MPa。国内赵艳荣等人[9]利用粉煤灰、赤泥制备了贝利特硫铝酸盐水泥，煅烧温度为 1350℃，28 天抗压强度达到 48.9 MPa。杜延男[10]利用粉煤灰代替硅灰制备了水化硅酸镁水泥，该水泥的碱度较低，这使得它在固封核废料和重金属离子等方面具有较大潜力，研究发现，在粉煤灰替代硅灰小于 40% 时不影响水泥性能，28 天的抗压强度可以达到 47 MPa。

2.2. 钢渣制备硅酸盐水泥研究

钢渣作为炼钢过程中产生的炉渣，其产量巨大，如何有效利用成为了一个亟待解决的问题。近年来，随着对钢渣的深入研究，其在建筑材料领域的应用逐渐受到关注。尤其是在水泥生产中，钢渣的研究取得了一定的进展。

钢渣中的游离石灰石是影响其在水泥中应用的主要因素。当钢渣水化时，游离石灰石会与石膏反应生成钙矾石，导致水泥体积膨胀，从而影响水泥性能。为了解决这一问题，研究人员[11]通过控制钢渣中的游离石灰石含量，以及调整熟料烧结温度等方法，成功制备出了具有良好性能的硅酸盐水泥熟料。

在国外，Tsakiridis 等人[12]利用钢渣作为原料生产了一种硅酸盐水泥熟料，其中钢渣在水泥熟料中占比为 10.5%。研究发现，在 1450℃ 下烧结的水泥熟料中的硅酸盐形貌发育良好，水泥砂浆 7、28 天的水化产物强度分别为 32、49 MPa，达到了 42.5 级别的硅酸盐水泥标准。Cao 等人[13]采用破碎钢渣模拟多相熟料烧结技术制备了水泥熟料。结果表明，经过高温处理后，采用钢渣使水泥熟料易磨性和水化活性得到明显改善；多相水泥早期龄期的水化活性略低于 42.5 级普通硅酸盐水泥，后期发展较快，用含 16.86% 钢渣的原料在 1400℃ 下制备的多相水泥熟料的可磨性和强度与普通硅酸盐水泥熟料相当。Žibret 等人[14]将钢渣掺入贝利特 - 硫铝酸盐水泥熟料中。结果表明，1250℃ 的烧结温度下实现了目标熟料的相组成。硫铝

酸钙相含量较高的水泥具有较高的抗压强度。国内刘二南等人[15]采用钢渣代替熟料中的铁质校正原料,结果表明,钢以 5% 掺量钢渣对应的熟料易烧性最佳,采用钢渣制备的硅酸盐水泥的各项性能均满足要求,其强度要高于普通熟料所制备的水泥的强度。刘晶晶等人[16]在水泥熟料中掺杂 15% 的钢渣掺入量在 1300℃ 煅烧,得到性能最佳的水泥熟料,水泥水化硬化后不出现裂纹,硬度较高,密度最大,球磨后粒度较好。

2.3. 铁矿尾矿在生产可持续水泥中的应用

铁矿石,作为全球矿石资源交易的重要商品,在工业领域中占有举足轻重的地位。每年大量开采导致铁矿石尾矿成为全球性的环境问题。以巴西为例,其每年的铁矿石尾矿产量已高达 2 亿吨,而且这一数字还会随着铁矿石产量的增长而持续上升[17][18]。这些铁尾矿主要由硅、铝和铁等氧化物组成,其生态产业链排放的二氧化碳占全球排放量的 9% [19],对全球气候变化产生了显著影响。因此,对铁矿石尾矿的回收和再利用成为了环境保护的重要研究课题。

Almeida 等研究者[20]尝试将铁尾矿添加到水泥中,来制备矿渣硅酸盐水泥。结果表明,在添加 20 wt% 的铁尾矿时,水泥的 28 天抗压强度与对照样品相当。尽管 7 天的抗压强度略有降低,但通过添加 20 wt% 的铁尾矿,水泥达到了 52.5 级别的硅酸盐水泥标准。Young 等人[21]报告了一种利用铁尾矿替代粘土作为原料,通过传统烧结工艺制备硅酸盐水泥熟料。铁尾矿添加量在 10 wt% 以下时,对矿物相的形成几乎没有影响。国内易龙生等人[22]利用铁尾矿制备了发泡水泥,发泡水泥作为一种新型建筑材料,不仅具有优异的绝缘性能、高机械强度、高耐火性和良好耐久性能,而且环保[23][24],不存在有机绝缘材料易燃、易老化等缺点[25],是目前较理想的建筑保温材料。研究发现,加入铁尾矿 55%、普通硅酸盐水泥 45%、发泡剂 8%、硬脂酸钙 0.35%、聚丙烯纤维 0.3%,在水灰比为 0.43 的条件下,发泡水泥 7 d 和 28 d 抗压强度分别为 1.35 MPa 和 1.65 MPa,密度为 698.25 kg/m³。王宏霞等人[26]的研究表明,铁尾矿取代铁粉来制备水泥熟料,有助于熟料矿相发育,使熟料具有较高的水化活性,其强度超过铁粉配制的水泥。

2.4. 金尾矿

中国是全球黄金产量最高的国家[27],但金矿石的开采过程中产生了大量的尾矿,对环境造成了严重的影响,如大量占用土地、破坏农田等[28]。为了解决这一问题,学者们一直积极探索将金尾矿转化为可利用资源的方法。

金尾矿主要由二氧化硅、氧化铝等氧化物组成,粒度非常细,这使得其作为生产硅酸盐水泥的理想原料。Wang 等研究者[29]利用金尾矿成功制备了硅酸盐水泥。经过 7 天和 28 天的养护,这种水泥的抗压强度分别为 43.8 MPa 和 57.7 MPa,抗折强度为 7.2 MPa 和 9.5 MPa。通过扫描电子显微镜(SEM)观察,发现在 7 天和 28 天的养护过程中,水泥中的 Ca(OH)₂ 和 C-S-H 凝胶体系发育良好。Çelik 等人[30]通过将硅酸盐水泥与干燥的金尾矿混合研磨,制备了矿渣硅酸盐水泥砂浆。结果表明,熟料中 25% 的金尾矿可用作波特兰水泥生产中的添加剂,对水泥生产大有裨益,添加金尾矿渣的矿渣硅酸盐水泥抗压强度达到了欧洲标准。国内张国强等人[31]以黄金尾矿和石灰石为原料,将黄金尾矿掺入水泥之中,结果表明,该掺合料可以替代 30% 的 P-II 52.5R 级水泥,生产得到的混凝土产品具有更高强度,而且具有较强的抗冻融破坏能力和耐硫酸盐腐蚀性能。郭家林等人[32]以金尾矿和水泥为主要原料,以双氧水作为发泡剂,辅以其他添加剂,制备了发泡水泥,利用正交试验法确定了最优配比。结果表明,最优的配方为双氧水量 4.5%、母料量 0.44%、水料比 0.45、金尾矿添加量 15%,制备的发泡水泥性能优异。

2.5. 铜尾矿

铜尾矿是铜矿石经过破碎、磨细和浮选等工艺后产生的工业废弃物,以矿浆形式存在[33]。中国每年

产生的铜尾矿超过 3000 万吨[34]，这一数字非常庞大。这些铜尾矿的主要矿物成分是辉铜矿(Fe_2SiO_4)等惰性矿物，密度高($3.6\sim 4.0\text{ kg/cm}^3$)，活性低。

大量的铜尾矿处置方式为露天堆放，不仅占用了大量的土地资源，还带来了严重的环境问题[35]。此外，铜尾矿中还含有一定量的重金属[36]，如 Zn、Cr、Ba、Mo、Cu 等。在遇到强降雨、酸雨或径流时，这些重金属可能会从铜尾矿中浸出，迁移到当地的农田地下水，对环境和人类健康造成严重威胁[37]。

为了解决铜尾矿的环境问题并实现资源化利用，许多学者进行了研究。其中，Jian 等人[38]在水泥生料中分别加入了 0 wt%、4 wt%、6 wt% 的铜尾矿，并对其抗压强度进行了测试。结果发现，在龄期为 28 天时，未添加铜尾矿的水泥抗压强度为 44 MPa，而添加了 4 wt% 和 6 wt% 铜尾矿的水泥抗压强度分别为 18.6 MPa 和 5.7 MPa。水化 60 天后，添加了 2 wt% 铜尾矿的水泥抗压强度显著提高，甚至高于未添加铜尾矿的样品。Cheng 等人[39]的研究采用 20.31 wt% 铜尾矿来配置生料，并且在熟料烧结完毕后添加 15 wt% 铜尾矿制备了硅酸盐水泥，相应力学指标达到 42.5 级，并且熟料具有良好的硅酸盐相。国内吴鑫等人[40]利用铜尾矿代替硅质原料来制备水泥熟料。结果表明，掺入铜尾矿后，水泥生料的易烧性变好，硅酸三钙(C_3S)的生成难度降低，在 1450°C 下煅烧的水泥熟料标准稠度用水量、凝结时间和安定性均符合 GB/T 21372-2008《硅酸盐水泥熟料》中的要求，其力学性能较未掺入铜尾矿时有明显提升。倪明江等人[41]利用铜尾矿掺配硅酸盐水泥，掺配比在小于 30% 的范围内，水泥安定性、凝结时间等水泥性能指标符合 42.5R 等级水泥要求。

2.6. 镍铁渣

镍铁渣是冶炼镍铁合金过程中产生的工业固体废弃物[42]，每年全球的排放量达到了约 3000 万吨。目前在我国镍铁渣已成为继铁渣、钢渣、赤泥之后的第四大冶炼渣。然而，镍铁渣的利用率极低，仅为 8%~15% 左右[43]。大量的镍铁渣被简单地填埋，不仅占用了大量的土地资源，还对环境造成了潜在的威胁，成为了影响镍铁企业可持续发展的重大问题[44]。

镍铁渣的主要成分包括 SiO_2 、 MgO 等氧化物。由于其中 MgO 的含量较高，直接制备硅酸盐水泥熟料是不可能的，所以直接使用镍铁渣只能是将镍铁渣作为水泥添加物，而不是直接用镍铁渣制备硅酸盐水泥，国外研究者[45]研究了在水泥砂浆中使用镍铁渣替代天然砂的效果。研究发现，矿渣的粒度分布适合用作混凝土中的细骨料。研究发现，新拌砂浆的流动性随着 FNS 的增加而增加，最高可达砂子的 50%，然后随着 FNS 的进一步增加而下降。高锋等人[46]通过硫酸浸出镍铁渣的方法，有效地降低了其中的 MgO 含量。经过配制好的生料高温煅烧后，通过扫描电子显微镜(SEM)与能量散射光谱(EDS)的观察，发现硅酸盐相的生长情况良好，力学性能指标可以达到 32.5 级。

3. 结论

本文讨论了我国制造业发展过程中产生的大量工业废物，包括粉煤灰、钢渣、铁镍渣、铜渣和铜尾矿等，这些废物对环境造成了严重污染。目前这些工业废物的主要处理方式仍为填埋，但这种处理方式存在诸多问题，如占用了大量的土地资源，可能会导致地面塌陷等地质灾害，以及这些工业废物含有的一些有毒有害物质会渗入地下水和土壤，对水源会造成极大的破坏。因此，如何将废弃物转化为有价值的资源成为了一个重要的研究方向。

文章详细介绍了粉煤灰、钢渣、铁矿石尾矿、金尾矿、铜尾矿、镍铁渣等六种工业废物在制备硅酸盐水泥方面的研究现状，这些研究成果为实现工业废物的资源化利用和环境保护提供了新的思路和方法。

参考文献

- [1] Adams, T.H. (2022) Coal Ash Recycling Rate Increases in 2020, Reversing Previous Years' Declines. American Coal Ash Association.

- <https://concreteproducts.com/index.php/2022/01/13/coal-ash-recycling-rate-increases-in-2020-reversing-previous-years-declines/>
- [2] Yang, H.J., Lee, C.H., Shim, S.H., *et al.* (2021) Performance Evaluation of Cement Paste Incorporating Ferro-Nickel Slag Powder under Elevated Temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, **15**, e00727. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00727>
 - [3] Wang, Y.L., Cui, S.P., Tian, G.P., *et al.* (2016) Effect of Fly Ash Composition and Structure on the Formation of Cement Clinker. *Key Engineering Materials*, **680**, 429-434. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.680.429>
 - [4] Darweesh, H.H.M. (2020) A Low Temperature Manufactured Portland Cement Clinker from Pulverized Waste of Fly Ash. *International Journal of Materials Science and Applications*, **9**, 34-39.
 - [5] Wu, K., Shi, H., De Schutter, G., *et al.* (2012) Preparation of Alinite Cement from Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 322-327. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.016>
 - [6] Kleib, J., Aouad, G., Abriak, N.E., *et al.* (2021) Production of Portland Cement Clinker from French Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. *Case Studies in Construction Materials*, **15**, e00629. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00629>
 - [7] Wu, K., Shi, H. and Guo, X. (2011) Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash for Sulfoaluminate Cement Clinker Production. *Waste Management*, **31**, 2001-2008. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.022>
 - [8] Li, J.H., Ma, H.W. and Zhao, H.W. (2007) Preparation of Sulphoaluminate-Alite Composite Mineralogical Phase Cement Clinker from High Alumina Fly Ash. *Key Engineering Materials*, **334**, 421-424. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.334-335.421>
 - [9] 赵艳荣, 陈平, 韦怀珺, 等. 利用粉煤灰、拜耳法赤泥制备贝利特硫铝酸盐水泥[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(3): 581-584.
 - [10] 杜延男. 利用粉煤灰替代硅灰制备水化硅酸镁水泥[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
 - [11] Monshi, A. and Asgarani, M.K. (1999) Producing Portland Cement from Iron and Steel Slags and Limestone. *Cement and Concrete Research*, **29**, 1373-1377. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00028-9)
 - [12] Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S. and Koroneos, C. (2008) Utilization of Steel Slag for Portland Cement Clinker Production. *Journal of Hazardous Materials*, **152**, 805-811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>
 - [13] Cao, L., *et al.* (2019) Process to Utilize Crushed Steel Slag in Cement Industry Directly: Multi-Phased Clinker Sintering Technology. *Journal of Cleaner Production*, **217**, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.260>
 - [14] Žibret, L., *et al.* (2021) The Incorporation of Steel Slag into Belite-Sulfoaluminate Cement Clinkers. *Applied Sciences*, **11**, Article 1840. <https://doi.org/10.3390/app11041840>
 - [15] 刘二南, 吴少鹏, 谢君, 等. 钢渣作为熟料烧成铁质校正原料的应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(2): 226-230.
 - [16] 刘晶晶, 何春艳, 宋杰光, 等. 利用钢渣制备水泥熟料及性能研究[J]. 萍乡学院学报, 2020, 37(3): 111-116.
 - [17] Mendes, B.C., Pedroti, L.G., Fontes, M.P.F., *et al.* (2019) Technical and Environmental Assessment of the Incorporation of Iron Ore Tailings in Construction Clay Bricks. *Construction and Building Materials*, **227**, Article ID: 116669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>
 - [18] Carmignano, O.R., Vieira, S.S., Teixeira, A.P.C., *et al.* (2021) Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **32**, 1895-1911. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>
 - [19] Reis, D.C., Quattrone, M., Souza, J.F.T., *et al.* (2021) Potential CO₂ Reduction and Uptake Due to Industrialization and Efficient Cement Use in Brazil by 2050. *Journal of Industrial Ecology*, **25**, 344-358. <https://doi.org/10.1111/jiec.13130>
 - [20] Almeida, V.O., Silvestro, L., Gleize, P.J.P., *et al.* (2023) Application of Leached Iron Ore Tailings to Produce Sustainable Cements. *Construction and Building Materials*, **377**, Article ID: 131095. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131095>
 - [21] Young, G. and Yang, M. (2019) Preparation and Characterization of Portland Cement Clinker from Iron Ore Tailings. *Construction and Building Materials*, **197**, 152-156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.236>
 - [22] 易龙生, 吴倩, 米宏成, 等. 利用铁尾矿制备发泡水泥[J]. 非金属矿, 2021, 44(1): 1-4.
 - [23] 陈虎, 沈卫国, 单来, 等. 国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J]. 混凝土, 2012(2): 88-92.
 - [24] 侯明显, 朱先昌, 李国青, 等. 泡沫混凝土的研究与应用概述[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 410-416. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.02.018>
 - [25] 王军, 范琛. 发泡水泥的制备及其物理力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(5): 152-155.

- [26] 王宏霞, 张文生, 叶家元. 铁尾矿替代铁粉制备硅酸盐水泥熟料的研究[C]//中国硅酸盐学会水泥分会. 中国硅酸盐学会水泥分会第六届学术年会论文摘要集. 北京: 中国建筑材料科学研究总院绿色建筑材料国家重点实验室, 2016: 75.
- [27] Chen, W., Geng, Y., Hong, J., *et al.* (2018) Life Cycle Assessment of Gold Production in China. *Journal of Cleaner Production*, **179**, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.114>
- [28] Olivier, G., De Wit, T., Brenguier, F., *et al.* (2018) Ambient Noise Love Wave Tomography at a Gold Mine Tailings Storage Facility. *Geotechnique Letters*, **8**, 178-182. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00016>
- [29] Wang, Q., Yao, G., Zhu, X., *et al.* (2019) Preparation of Portland Cement with Gold Ore Tailings. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2019**, Article ID: 1324065. <https://doi.org/10.1155/2019/1324065>
- [30] Çelik, Ö., Elbeyli, I.Y. and Piskin, S. (2006) Utilization of Gold Tailings as an Additive in Portland Cement. *Waste Management & Research*, **24**, 215-224. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064358>
- [31] 张国强, 肖国先, 郜志海, 等. 黄金尾矿制备高贝利特相胶凝材料试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(11): 72-74, 89.
- [32] 郭家林, 王之宇. 金尾矿发泡水泥制备及性能研究[J]. 矿产综合利用, 2017(2): 105-108.
- [33] Jiao, R.M., Xing, P., Wang, C.Y., *et al.* (2017) Recovery of Iron from Copper Tailings via Low-Temperature Direct Reduction and Magnetic Separation: Process Optimization and Mineralogical Study. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **24**, 974-982. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1485-3>
- [34] Lü, C., Wang, Y., Qian, P., *et al.* (2018) Separation of Chalcopyrite and Pyrite from a Copper Tailing by Ammonium Humate. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **26**, 1814-1821. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.02.014>
- [35] Pan, H., Cheng, Z., Zhou, G., *et al.* (2017) Geochemical and Mineralogical Characterization of Tailings of the Dexing Copper Mine, Jiangxi Province, China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **17**, 334-344. <https://doi.org/10.1144/geochem2016-457>
- [36] Liu, S., Li, Q. and Song, J. (2018) Study on the Grinding Kinetics of Copper Tailing Powder. *Powder Technology*, **330**, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.025>
- [37] Gupta, R.C., Mehra, P. and Thomas, B.S. (2017) Utilization of Copper Tailing in Developing Sustainable and Durable Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**, Article ID: 04016274. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001813](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001813)
- [38] Jian, S., Gao, W., Lv, Y., *et al.* (2020) Potential Utilization of Copper Tailings in the Preparation of Low Heat Cement Clinker. *Construction and Building Materials*, **252**, Article ID: 119130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119130>
- [39] Cheng, Y., *et al.* (2023) Feasibility Study on Utilization of Copper Tailings as Raw Meal and Addition for Low Carbon Portland Cement Production. *Construction and Building Materials*, **382**, Article ID: 131275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131275>
- [40] 吴鑫, 徐迅, 毛作宾, 等. 铜尾矿全替代硅质原料制备水泥熟料的研究[J]. 非金属矿, 2023, 46(6): 40-44.
- [41] 倪明江, 焦有宙, 骆仲泱, 等. 金属尾矿作水泥混合材活性试验研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 868-872. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2007.05.026>
- [42] Cho, B.S., Kim, Y.U., Kim, D.B. and Choi, S.J. (2018) Effect of Ferronickel Slag Powder on Microhydration Heat, Flow, Compressive Strength, and Drying Shrinkage of Mortar. *Advances in Civil Engineering*, **2018**, Article ID: 6420238. <https://doi.org/10.1155/2018/6420238>
- [43] 吴春丽, 谢红波, 陈哲, 等. 镍铁渣资源化综合利用现状研究[J]. 广东建材, 2019, 35(6): 77-79.
- [44] 李小明, 沈苗, 王翀, 等. 镍渣资源化利用现状及发展趋势分析[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 100-105.
- [45] Saha, A.K. and Sarker, P.K. (2017) Compressive Strength of Mortar Containing Ferronickel Slag as Replacement of Natural Sand. *Procedia Engineering*, **171**, 689-694. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.410>
- [46] 高锋, 梁振佳, 雷西虎, 等. 镍铁渣硫酸浸出渣制备硅酸盐水泥熟料工艺研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10): 3703-3709. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2023.10.017>