

# The Latest Research Progress of Green Building Materials in Lead and Zinc Tailings

Qing Liu, Yuan Li\*, Guodong Zhao

School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan  
Email: 48841135@qq.com, \*1786822436@qq.com, zgd777908@163.com

Received: Mar. 14<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 4<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In recent years, domestic and foreign researchers have used lead and zinc tailings to prepare green building materials for analysis. The preparation of geopolymers and foamed ceramics from lead-zinc tailings is discussed; and the reduction of heavy metal solidification and radiation protection of lead-zinc tailings-based building materials is introduced. Research indicates that the lead-zinc tailings-based green building materials have high strength, heavy metal curing and radiation protection. Finally, the application and prospect of lead-zinc tailings in the field of building materials are analyzed, which provides a theoretical basis for the researchers in the field.

## Keywords

Lead-Zinc Tailings, Green Building Materials, Strength, Radiation Protection, Heavy Metal Curing

---

# 铅锌尾矿绿色建材化最新研究进展

刘清, 李渊\*, 招国栋

南华大学土木工程学院, 湖南 衡阳  
Email: 48841135@qq.com, \*1786822436@qq.com, zgd777908@163.com

收稿日期: 2019年3月14日; 录用日期: 2019年3月28日; 发布日期: 2019年4月4日

---

## 摘要

对近几年国内外科研人员利用铅锌尾矿制备绿色建筑材料进行分析。从利用铅锌尾矿制备地聚物、发泡陶瓷进行主要论述; 并简单介绍了铅锌尾矿基建筑材料的重金属固化及防辐射能力; 研究结果表明: 铅锌尾矿基绿色建筑材料具有高强、重金属固化以及防辐射等性能。最后对铅锌尾矿在建筑材料领域的应

\*通讯作者。

用进行了分析与前景展望,为后期在该领域探索的科研工作者提供理论依据。

## 关键词

铅锌尾矿, 绿色建筑材料, 强度, 防辐射, 重金属固化

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

铅锌矿开采过程中产生的尾矿含铅、锌、铜、镉等重金属离子,长期露天堆积不仅占用土地资源,更对周边大气、水、土壤等环境造成污染,为居民的生活质量埋下安全隐患[1]-[6]。铅锌尾矿具有易烧性好、化学特征与水泥、黏土性质相近等优点,因此,利用铅锌尾矿制作建筑材料(如水泥、混凝土、墙板)受到各界人士的重视,相关领域发展迅猛[7] [8] [9]。根据铅锌尾矿的物理、化学性质,科研人员利用铅锌尾矿制备地质聚合物(简称地聚物, Geopolymer)、陶瓷等绿色建筑材料,并取得显著效果。应用铅锌尾矿制备绿色建筑材料的主要原因包括:

1) 地聚物早期强度高[10] [11]、耐高温[12] [13]、耐腐蚀[14] [15]、耐辐射[16]、较强重金属固化能力[17] [18];制备建筑材料能耗低、成本低、二氧化碳排放量少;

2) 铅锌尾矿中制备陶瓷所需的硅铝元素含量高(见表 1,各化学成分百分比为摩尔质量百分比);陶瓷强度高[19],可固定尾矿中的重金属离子(见表 2) [20]。

本文主要从利用铅锌尾矿制备地聚物、陶瓷进行论述,并介绍了铅锌尾矿基绿色建筑材料的防辐射及重金属固化能力。预测铅锌尾矿在新型绿色建筑材料方面的发展趋势,为该领域科研工作者提供理论依据。

**Table 1.** Chemical composition of lead and zinc tailings raw materials/%

**表 1.** 铅锌尾矿原料的化学成分/%

原料来源	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>
Mining Company in Nanjing [10]	36.95	<b>22.85</b>	<b>4.57</b>	9.62	2.67	/	/	14.03	/
江西矿业有限公司[21]	2.97	<b>48.25</b>	<b>14.4</b>	9.89	1.06	0.08	2.44	/	/
广东某矿冶公司[22]	5.04	<b>64.56</b>	<b>11.21</b>	1.91	1.39	0.56	2.18	0.61	0.57
Mining Company in Yunnan [23]	12.48	<b>30.67</b>	<b>7.27</b>	29.73	3.27	0.72	0.96	2.97	0.9

**Table 2.** Heavy metal content in soil of lead-zinc tailings mining area (unit: mg/kg)

**表 2.** 铅锌尾矿矿区土壤重金属含量(单位: mg/kg)

尾矿来源	Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	As	Ni	Mn
陕南铅锌尾矿区[3]	69.43	223.99	196.04	0.37	/	/	37.36	937.48
湖南桥口铅锌矿尾矿库[4]	2773.5	/	/	58.8	124	3579	/	/
福建省大田县金源矿区[5]	879	12480	132	20	11	23	3	21,400
湖南省郴州市观山洞矿区[6]	5512.8	5008.2	309.34	68.034	/	/	/	/

## 2. 铅锌尾矿在地聚物方面的应用

地聚物(又叫无机聚合物,或矿聚合物)通过缩聚连锁反应形成不定态的硅氧四面体与铝氧四面体三维网络状结构,由法国科学家 Davidovits 首次研发[24]。Davidovits 将复合碱性激发剂溶剂与粉煤灰、矿渣、高岭土等含有硅铝原料的固体废弃物混合后,通过浇筑、压制成型或超声波辅助等方法制备具有早期强度高、耐高温、耐腐蚀、耐辐射、较强重金属离子固化能力的地聚物[24]。近年来,随着地聚物的不断发展,有效处理重金属含量高的固体废弃物已引起了国内外许多科研人员与企业的足够重视。利用铅锌尾矿制备地聚物研究较少,但在理论上已取得了一定的成果;铅锌尾矿能制备出力学性能好、重金属固化与防辐射性能强的地聚物固化体。

铅锌尾矿替代水泥或将铅锌尾矿与固体废弃物混合制备地聚物,可以增强胶凝效果,提高地聚物密实度与强度性能。如利用碱浸铅锌渣地聚物砂浆试块,当模数、碱激发剂掺量、矿渣掺量分别为 1.2、65%、45%时,常温养护 28 d 后地聚物发生缩聚反应生成  $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{Na}_6\text{Si}_8\text{O}_{19}$ ,抗压强度高达 49.6 MPa,材料结构强度和稳定性明显增强[25]。李北星等[21]以 70%铅锌尾矿、30%矿粉(武钢 S95 级)为催化剂,水玻璃模数为 1.0,碱含量 9%,在 50℃养护下,可以制备出 28 d 抗压强度为 55 MPa 左右的高强的地聚物。矿粉不仅能够有效提高铅锌尾矿地聚物的密实度,还提高了铅锌尾矿的高硅、铝氧化物含量,促进碱激发反应,最终产物微观结构为三维网络状(铝氧四面体和硅氧四面体交替键合)。孙双月等[26]以铅锌废渣为主要原料、水玻璃和分析纯混合作为复合碱性激发剂,制备抗压强度达 33.93 MPa 碱激发胶凝材料。碱激发胶凝材料较普通硅酸盐水泥材料密实度与抗压强度高的主要原因产物中含有大量的 C-S-H、C-AI-S-H 等凝胶,未彻底反应的颗粒被凝胶体包裹胶结在一起,而普通硅酸盐水泥有大量针状钙矾石纤维存在,导致结构密实度低。

机械研磨与高温煅烧可以提升矿渣活化度,提高地聚物结构密实度与结构强度。孙双月[27]在试验的基础上,加入脱硫石膏。研究了预粉磨时间、混磨时间、脱硫石膏掺量和水玻璃掺量的影响。通过 XRD 和 SEM 分析得出:标准养护 28 d 的胶凝材料结构内包含大量凝胶体,中间穿插针状钙矾石,降低孔洞率,提高结构密实度。密实度的提高一方面是因为加入了脱硫石膏,另一方面是铅锌废渣粒度的变化。如加入 4wt%脱硫石膏、9wt%水玻璃,预粉磨 60 min、混磨 70 min,28 d 龄期时地聚物的抗压强度达到 36.48 MPa。

铅锌尾矿基地聚物具有良好的重金属固化能力。郭斌以铅锌废渣为原料制备粉煤灰基地聚物,并研究其对 Pb、Cd 的固化效果[28]。TCLP 浸出毒性结果表明地聚物中 Pb、Cd 的浸出浓度均符合标准。地聚物中 Cd 仅存在物理包覆作用,而 Pb 除了物理包覆,还具有“碱溶-胶凝网络键合”固化机制,因此该地聚物对 Pb 具有更好的固化效果。

## 3. 铅锌尾矿在发泡陶瓷方面的应用

发泡陶瓷具有轻质、隔音、耐高温、耐腐蚀等优点,在建筑、国防、化工等方面应用甚广。根据发泡剂不同,分为高温发泡陶瓷和低温发泡陶瓷[29] [30]。研究者以含硅铝氧化物的固体废弃物(如电解锰渣、煤矸石、粉煤灰等)为掺和料制备低成本、高性能的发泡陶瓷[31] [32]。利用铅锌尾矿制备发泡陶瓷取得良好的效果,相关研究成为热点。

提高烧结温度能够提高发泡陶瓷闭合孔率、降低导热率增强力学性能。Taoyong Liu 等采用粉末冶金技术,以铅锌尾矿、赤泥和硅砂为主要原料,硼酸钠( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )作为助熔剂制备泡沫陶瓷材料。结果表明,适当的烧结温度能够促进发泡陶瓷内部闭合孔隙的形成,当烧结温度升高到 970℃时,发泡陶瓷具有多孔、低导热率、隔热效果好等优点。由于其导热率比较低以及孔隙分布较广,制备的发泡陶瓷材料在隔热建筑板材方面应用甚广[33]。Taoyong Liu 等[34]以铅锌尾矿(同时作为发泡剂),赤泥,粉煤灰为主要原料,引

用  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  作为助熔剂制备多孔发泡陶瓷材料。通过表征和结晶相分析得出：掺入 18wt% 铅锌尾矿、烧结温度为 980℃ 时能够制备出性能最优的多孔发泡陶瓷材料。测试结果表明，材料达到最优时的体积密度、孔隙率分别为  $0.67 \text{ g/cm}^3$ 、69.2%；抗压强度在 7 MPa 以上、弯曲强度超过 6 MPa。Taoyong Liu 等[35]以铅锌尾矿、粉煤灰为主要原料(不掺加任何发泡剂和助熔剂)，混合搅拌均匀后，在 20 MPa，1200℃ 下烧结 2 h 后制备出无机多孔陶瓷。通过显微结构分析，当粉煤灰掺量达到 60wt% 时，有钙长石晶相生成；性能试验表明，弯曲强度高达 11.9 MPa。相比之前采用赤泥制备陶瓷的实验，弯曲强度提高 5.9 MPa。并且此材料的化学稳定性较好，固体废弃物利用率高，其中 60wt% 粉煤灰的无机多孔陶瓷材料可以应用到建筑材料中。

#### 4. 铅锌尾矿基建筑材料的重金属固化与防辐射性能

大量产生的铅锌尾矿补充了建筑原料短板。考虑铅锌尾矿中的重金属含量较高，在将其应用到建筑材料之前，必须进行重金属固化理论研究，探索铅锌尾矿在建筑材料方面利用的可行性；其次，含有重金属元素的建筑材料具有高能射线屏蔽效果， $\gamma$  射线屏蔽效果更为显著[36]。目前铅锌尾矿在水泥、砂浆、混凝土以及地聚物等建筑材料方面的重金属固化与防辐射方面取得不错的进展。以下通过铅锌尾矿基建筑材料的重金属固化以及防辐射性能两个方面进行详细阐述。

##### 4.1. 重金属固化建筑材料

熟料的煅烧温度是铅锌尾矿基水泥熟料重金属固化能力的主要影响因素。重金属含量随着水泥生料的种类与配比的变化而变化；煅烧温度不同，水泥熟料重金属固化率则不同；而固化率是指熟料煅烧后重金属含量的变化(公式(1))；固化率越高，熟料中重金属含量越高；反之，则重金属含量越低，从而煅烧过程中损失的重金属对环境产生污染。铅锌尾矿基建筑材料投入生产市场化前，必须进行浸出毒性理论实验研究；且各重金属浸出液浓度必须符合 GB5085.3-2007 技术参数要求。为了减少重金属元素随废气排出或因雨水冲刷渗入地下水；以铅锌尾矿为原料生产水泥熟料得到初步的发展(如表 3、表 4、表 5)。

$$CR = \frac{C \times (1 - Loss)}{Rm} \quad (1)$$

式中，CR 表示重金属固化率，%；C 为水泥熟料中包含的重金属的量，mg/kg；Loss 代表水泥熟料烧失率，%；Rm 为水泥生料中的重金属含量，mg/kg。

**Table 3.** Analysis of heavy metal curing ability of lead-zinc tailings based building materials

**表 3.** 铅锌尾矿基建筑材料重金属固化能力分析

材料类别	主要影响因素	最高固化率/%					参考文献
		Zn	Pb	Cu	Cd	As	
水泥	煅烧温度	98.23	14.97	/	29.68	/	[37]
		86.41	14.60	82.71	35.74	/	[38]
		89.76	15.19	/	73.20	83.62	[39]
		91.43	21.16	/	/	87.61	[40]

**Table 4.** Heavy metal leaching toxicity identification standard value

**表 4.** 重金属浸出毒性鉴别标准值

重金属	Zn	Pb	As	Cu	Cd
限值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	100.000	5.000	5.000	100.000	1.000

**Table 5.** Analysis of heavy metal leaching concentration of lead-zinc tailings-based building materials  
**表 5.** 铅锌尾矿基建筑材料重金属浸出浓度分析

材料类别	重金属浸出浓度/mg·L <sup>-1</sup>					参考文献
	Zn	Pb	As	Cu	Cd	
净浆	0.037	0.072	0.072	/	/	[40]
砂浆	1.740	1.340	/	/	/	[41]
混凝土	3.480	4.550	/	/	/	[42]
免烧砖	0.980	0.054	0.070	0.20	0.030	[43]
地聚物	/	1.087	/	/	0.032	[28]

碱性环境下可以制备出 Pb<sup>2+</sup>离子固化性能较好的铅锌尾矿基水泥材料。Dan Zhang, *et al.* [44]以铅锌冶炼渣和尾矿为主要生产原料制备水泥胶凝材料;探讨 pH 值和浸出时间对胶凝材料固化 Pb<sup>2+</sup>的能力。Pb<sup>2+</sup>在酸性环境下易形成金属化合物,从而造成 Pb<sup>2+</sup>离子的大量浸出;在碱性环境中(pH 12.0), Pb<sup>2+</sup>的溶出量大概只有 2.5 mg/g 左右。

#### 4.2. 防辐射建筑材料

目前国内外防辐射水泥的研究应用领域主要集中在钡水泥、锶水泥、含硼水泥[45] [46] [47],这些水泥存在防辐射效果单一且热稳定性差的缺点。铅锌尾矿中含有制备防辐射性能原料或重金属元素,在防辐射建材领域,铅锌尾矿的利用有着深远的研究意义和广阔的发展前景。

铅锌尾矿能够提高建筑材料的密度、强度与  $\gamma$  辐射屏蔽性能。Mohamed Alwaeli [48]利用 50wt%鳞片状铅锌废渣和 50wt%造粒铅锌废渣代替天然砂制备混凝土。结果表明,铅锌废渣混凝土比普通混凝土的抗压强度高出 20%左右;并且当密度增加 30%时,线性衰减系数约增加 23%, $\gamma$  辐射屏蔽能力显著提升。除此之外,在相同  $\gamma$  辐射屏蔽强度下,铅锌废渣制备的混凝土防护罩厚度较薄,应用在防辐射建筑材料方面,能够有效地减少空间。防辐射性能的增强主要源于一级铅渣以及重晶石;Saca, N., *et al.*研究了利用一级铅渣作为掺合料制备重质混凝土,并制备出抗压强度 50 MPa 之多,线性衰减系数高达 0.35 cm<sup>-1</sup>的高强度  $\gamma$  辐射屏蔽性能[49]。材料的表观密度与  $\gamma$  射线屏蔽性能密切相关,研究表明:铅锌尾矿防辐射混凝土的表观密度越大, $\gamma$  射线屏蔽性能越强[50];根据铅锌尾矿防辐射混凝土的强  $\gamma$  射线屏蔽性能,以后可以作为防护体推广应用在医疗、核工业等放射性强的领域。

### 5. 总结与展望

铅锌尾矿重金属含量高,不规范堆放处理将会对居民生活质量埋下安全隐患。研究表明,利用铅锌尾矿生产绿色建材是处理固体废弃物、变废为宝的有效途径之一。为了更进一步地拓宽铅锌尾矿在建材方面的应用并保证不会对环境造成二次污染,以下几个方面有待进一步的研究:

- 1) 初步理论研究表明:铅锌尾矿基地聚物各项性能优越;但是缺乏反应机理、内部结构、重金属固化机理、防辐射性能方面的研究。
- 2) 针对利用铅锌尾矿制备多孔发泡陶瓷的隔热、导热率、耐腐蚀等性能进行更为系统的研究。在环保生产、工艺简单的前提下制备高耐久性无机多孔发泡陶瓷。
- 3) 铅锌尾矿可以用来制备防辐射建筑材料。重金属含量高的铅锌尾矿兼有制备地聚物的硅铝氧化物有效成分;结合地聚物重金属固化能力强以及在防辐射方面鲜有人研究这些优势;在地聚物新领域中,利用铅锌尾矿制备一种具有高重金属固化率、强防辐射性能、低成本建筑材料有待研究。

## 参考文献

- [1] 梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等. 铅锌尾矿库对周围环境重金属污染风险评价指标的建立及方法[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1772-1780.
- [2] Zhao, Z.W., Shen, M., Zhan, F.D., *et al.* (2016) Heavy Metal Pollution and Accumulation in Maize Grown in Arable Soils Located near a Lead and Zinc Slag Heap in Yunnan, Southwest China. *International Journal of Environment and Pollution*, **59**, 97. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2016.10000734>
- [3] 汤波. 陕南铅锌尾矿区土壤重金属污染特征及来源分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 271-275.
- [4] 高国龙, 张望, 周连碧, 许亚丽, 陈霏云, 巫秋萍, 等. 纳米 CeO<sub>2</sub> 对铅锌尾矿中重金属离子溶出特性影响的研究[J]. 功能材料, 2017, 48(2): 2135-2139.
- [5] 贾冬琴, 柯平. 面向数学素养的高校图书馆数字服务系统研究[C]//中国图书馆学会. 中国图书馆学会年会论文集: 2011 年卷. 北京: 国家图书馆出版社, 2011: 45-52.
- [6] 黄雷, 张时伟, 任重, 等. 不同材料对铅锌尾矿重金属浸出毒性影响[J]. 环境保护与循环经济, 2016, 36(8): 38-42.
- [7] Nouairi, J., Hajjaji, W., Costa, C.S., *et al.* (2018) Study of Zn-Pb Ore Tailings and Their Potential in Cement Technology. *Journal of African Earth Sciences*, **139**, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.004>
- [8] 范定强, 水中和, 余睿, 等. 铅锌尾矿回收制备环保型超高性能混凝土研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7): 2231-2236.
- [9] 石振武, 薛群虎. 国内铅锌尾矿建材化研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 508-512.
- [10] Pan, Z., Zhang, J. and Liu, W. (2015) Solidification/Stabilization of Zinc-Lead Tailings by Alkali Activated Slag Cement. *Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition*, **30**, 105-108. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1109-6>
- [11] 罗浩, 刘鸣明, 刘文白, 等. 粉煤灰基地聚物材料的早期强度及其微观结构[J]. 化工新型材料, 2018, 46(10): 149-151+155.
- [12] Colangelo, F., Cioffi, R., Roviello, G., *et al.* (2017) Thermal Cycling Stability of Fly Ash Based Geopolymer Mortars. *Composites Part B: Engineering*, **129**, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.029>
- [13] 张海燕, 祁术亮, 曹亮. 地聚物净浆、砂浆和混凝土高温后力学性能比较[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(1): 11-16.
- [14] 胡洁. 碱激发胶凝材料的耐腐蚀性及固化 Pb<sup>2+</sup> 的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [15] Aiken, T.A., Kwasny, J., Sha, W. and Soutsos, M.N. (2018) Effect of Slag Content and Activator Dosage on the Resistance of Fly Ash Geopolymer Binders to Sulfuric Acid Attack. *Cement and Concrete Research*, **111**, 23-40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.011>
- [16] Montes, C., Broussard, K., Gongre, M., *et al.* (2015) Evaluation of Lunar Regolith Geopolymer Binder as a Radioactive Shielding Material for Space Exploration Applications. *Advances Space in Research*, **56**, 1212-1221. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.044>
- [17] Guo, X., Zhang, L., Huang, J. and Shi, H. (2017) Detoxification and Solidification of Heavy Metal of Chromium Using Fly Ash-Based Geopolymer with Chemical Agents. *Construction and Building Materials*, **151**, 394-404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.199>
- [18] 廖希雯, 陈杰, 范天凤, 等. 地质聚合物固化稳定化重金属复合污染土壤[J]. 环境工程学报, 2018, 12(7): 2056-2065.
- [19] 任鑫明, 马北越, 李世明, 等. 工业废渣制备多孔陶瓷的研究进展[J]. 耐火材料, 2018(5): 396-400.
- [20] 魏婧婧. 赤泥质多孔陶瓷材料的制备及对重金属 Cr(VI) 吸附的研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [21] 李北星, 冯紫豪, 叶茂, 等. 原状铅锌尾矿制备地聚物的研究[J]. 混凝土, 2018(1): 68-71.
- [22] 孙双月, 牛丽红, 王聪. 铅锌冶炼废渣和尾矿制备地聚合物的研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(7): 48-52.
- [23] Li, S., Huang, X., Muhammad, F., *et al.* (2018) Waste Solidification/Stabilization of Lead-Zinc Slag by Utilizing Fly Ash Based Geopolymers. *RSC Advances*, **8**, 32956-32965. <https://doi.org/10.1039/C8RA06634E>
- [24] Davidovits, J. (1994) Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education*, **16**, 91-139.
- [25] 刘清, 唐卫兵, 招国栋. 碱浸铅锌渣地聚物的制备及其力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2650-2655.
- [26] 孙双月, 蔡靖. 利用铅锌冶炼废渣制备碱激发胶凝材料的实验研究[J]. 广东化工, 2016, 43(5): 39-40.

- [27] 孙双月. 利用冶炼渣制备地聚合物胶凝材料的正交试验研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(3): 146-150.
- [28] 郭斌. 铅锌冶炼渣制备微晶玻璃和地质聚合物及其铅镉固化机理[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [29] 叶芬, 车龙, 刘勇闯, 等. 发泡陶瓷的研究现状与展望[J]. 广州化工, 2017, 45(15): 9-10.
- [30] 张留生, 邱永斌. 高温发泡陶瓷及其应用[J]. 新型建筑材料, 2005(5): 58-59.
- [31] 罗学维, 陈益人, 赵皇, 等. 铝硅系固体废弃物制备发泡陶瓷保温板研究进展[C]//第七届尾矿与冶金渣综合利用技术研讨会暨招远市循环经济项目招商对接会.
- [32] 罗学维, 石朝军, 陈上, 等. 电解锰渣制备轻质发泡陶瓷保温板工艺及性能研究[J]. 中国锰业, 2016, 34(6): 125-129.
- [33] Liu, T., Li, X., Guan, L., *et al.* (2016) Low-Cost and Environment-Friendly Ceramic Foams Made from Lead-Zinc Mine Tailings and Red Mud: Foaming Mechanism, Physical, Mechanical and Chemical Properties. *Ceramics International*, **42**, 1733-1739. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.131>
- [34] Liu, T., Tang, Y., Li, Z., *et al.* (2016) Red Mud And Fly Ash Incorporation for Lightweight Foamed Ceramics Using Lead-Zinc Mine Tailings as Foaming Agent. *Materials Letters*, **183**, 362-364. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.07.041>
- [35] Liu, T., Tang, Y., Han, L., *et al.* (2017) Recycling of Harmful Waste Lead-Zinc Mine Tailings and Fly Ash for Preparation of Inorganic Porous Ceramics. *Ceramics International*, **43**, 4910-4918. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.142>
- [36] 丁庆军, 王承, 刘勇强, 等. 烧成制度对电镀渣泥防辐射功能集料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 887-893.
- [37] 周喜艳. 利用铅锌尾矿作掺料制备水泥研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [38] 张志海. 利用铅锌尾矿作为水泥掺料的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [39] 何哲祥, 肖祈春, 周喜艳, 等. 铅锌尾矿制备水泥熟料及重金属固化特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3961-3968.
- [40] 高锦城, 倪文, 于淼, 等. 以铅锌尾矿为原料煅烧水泥熟料[J]. 金属矿山, 2017(3): 192-196.
- [41] 胡志敏. 碱浸铅锌渣粉胶砂的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2016.
- [42] Wang, X., Yu, R., Shui, Z., *et al.* (2018) Development of a Novel Cleaner Construction Product: Ultra-High Performance Concrete Incorporating Lead-Zinc Tailings. *Journal of Cleaner Production*, **196**, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.058>
- [43] 李冲, 许亚丽, 于岩, 等. 铅锌尾矿免烧吸附砖的制备与研究[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(4): 46-51.
- [44] Zhang, D., Shi, S., Wang, C., *et al.* (2015) Preparation of Cementitious Material Using Smelting Slag and Tailings and the Solidification and Leaching of Pb<sup>2+</sup>. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2015**, Article ID: 352567. <https://doi.org/10.1155/2015/352567>
- [45] 熊俊, 宋涛. 防辐射材料的研究进展[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(12): 2209-2212.
- [46] 杨文峰, 刘颖, 杨林, 等. 辐射屏蔽材料的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 82-85.
- [47] 伍崇明, 丁德馨, 丛成河, 等. 密度 5.7 t/m<sup>3</sup> 屏蔽  $\gamma$  射线混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2007(7): 5-8.
- [48] Alwaeli, M. (2017) Investigation of Gamma Radiation Shielding and Compressive Strength Properties of Concrete Containing Scale and Granulated Lead-Zinc Slag Wastes. *Journal of Cleaner Production*, **166**, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.203>
- [49] Saca, N., Radu, L., Fugaru, V., *et al.* (2018) Composite Materials with Primary Lead Slag Content: Application in Gamma Radiation Shielding and Waste Encapsulation Fields. *Journal of Cleaner Production*, **179**, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.045>
- [50] 吴庆文, 陈西子, 陈艳蕾, 等. 铅锌尾矿制备防辐射混凝土的实验研究[J]. 陶瓷学报, 2018, 39(6): 769-775.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2373-1478，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)