冶金渣制备泡沫陶瓷的现状、问题和展望

徐佳美，刘继成，苏子键，张元波
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：泡沫陶瓷是一种气孔率高、热稳定性好、耐酸碱的陶瓷材料。冶金渣的化学成分与泡沫陶瓷原料十分接近，适合用来制备泡沫陶瓷。本文通过分析泡沫陶瓷各种制备方法的优缺点及区别，综述几类典型冶金渣（钢渣、高炉渣、镍铁渣和赤泥）制备泡沫陶瓷的研究现状，并重点分析冶金渣制备泡沫陶瓷的主要问题。结论表明：用冶金渣可以制备气孔率高、强度适宜的泡沫陶瓷，但制品的孔径及其分布难以控制；冶金渣原料粒度、物相组成及成分对泡沫陶瓷制备过程和产品性能有很大影响；原料中 Na、K、Mn、Cr 等具有潜在危害的元素在制备过程中的走向和固化机理，以及制品的浸出毒性也是目前研究需要重点关注的问题。采用冶金渣制备泡沫陶瓷，可以实现废物资源化的同时保护环境，并且得到高附加值的产品，具有重要的意义。

关键词：冶金渣；泡沫陶瓷；造孔剂法；制备工艺；发泡
中图分类号：TF09；TQ174.75 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0023－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.081

Present situation, problems and prospect of using metallurgical slag to prepare foam ceramics

XU Jiamei, LIU Jicheng, SU Zijian, ZHANG Yuanbo
(*School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: Foam ceramic is a ceramic material with high porosity, good thermal stability and acid & alkali resistance. The chemical composition of metallurgical slag is very close to the raw materials of foam ceramics, so it is suitable for preparing foam ceramics. By analyzing the advantages, disadvantages and differences of various preparation methods of foam ceramics, the research status of using several typical metallurgical slags (steel slag, blast furnace slag, ferronickel slag and red mud) to prepare foam ceramics are listed, and the main problems of preparing foam ceramics from metallurgical slag are emphatically analyzed. The results show that the foam ceramics with high porosity and appropriate strength can be prepared by metallurgical slag, but the pore size and distribution of the products are difficult to control. The particle size, phase composition and contents of metallurgical slag raw material have great influence on the preparation process and product performance of foam ceramics. The trend and solidification mechanism of potentially harmful elements such as Na, K, Mn, Cr in raw materials during the preparation process, as well as the leaching toxicity of products, are also issues that need to be focused on at present. It is of great significance to prepare foam ceramics from metallurgical slag, which can realize waste recycling and protect the environment at the same time, and obtain high value-added products.

Key words: metallurgical slag; foam ceramics; pore-forming agent method; preparation technology; foam

泡沫陶瓷是继普通多孔陶瓷、蜂窝陶瓷之后发展起来的第三代多孔陶瓷制品[1]。其是以矿物、纯物质或固废为主要原料，添加适量添加剂采用不同制备工艺得到的多孔材料[2]。常

收稿日期：2022－09－21；**修回日期**：2022－10－13
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5745&2021JJ30858)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021zzts0293)
作者简介：徐佳美(1999—)，女，硕士研究生，从事固体废弃物资源化方面的研究。
通信作者：张元波(1976—)，男，博士生导师，教授，从事铁矿造块与直接还原、低碳清洁冶金、冶金固废资源化等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

见的泡沫陶瓷有氧化铝[3]、莫来石[4-5]、碳化硅[6]等。由于具有密度低、气孔率高(一般高达70%~90%)[7]、耐高温、耐腐蚀和热稳定性强等优良特性，泡沫陶瓷在冶金、化工、航空航天及汽车等领域被广泛应用。起初制备泡沫陶瓷的原料主要为石英、长石等矿物或纯物质(如碳化硅)，但由于自然资源不断匮乏以及原料成本提高，研究者开始把目光转向以工业固废制备泡沫陶瓷。其中冶金渣因含有质量分数较大的氧化钙、氧化硅、氧化铁和氧化铝等成分，这与泡沫陶瓷胚料适宜的化学成分相似，因此可以用来制备泡沫陶瓷。

冶金行业作为国家重要的基础工业，在提升国民经济方面起着无可替代的作用，但同时也产生了大量的固体废弃物。例如，2020 年我国钢渣、赤泥、高炉渣和镍铁渣的产生量分别约为 1.50、1.10、3.55 亿吨及 3 000 万吨[8]。由于冶金渣普遍含有有害成分(如重金属等)，使得其回收利用难度较大以致总体利用率偏低，其中钢渣利用率不足 30%，赤泥利用率甚至低于 5%。未经利用的冶金渣主要以充填或堆存的方式处理，这不仅会占用大面积的土地资源，而且还会导致严重的环境污染，甚至影响人类生命健康。《“十四五”循环经济发展规划》中也明确强调：要加强资源的综合利用，进一步拓宽粉煤灰、煤矸石、冶金渣等大宗固废综合利用渠道，提升大宗固废对原生资源的替代比例。因此，利用冶金渣制备泡沫陶瓷对推动绿色发展、实现双碳目标有着重要的意义。

虽有学者对冶金渣制备多孔陶瓷的研究进行了综合评述，但是缺少对冶金渣制备多孔陶瓷的方法、多孔陶瓷物相以及性能之间差异问题的关注。本文通过分类与总结冶金渣制备泡沫陶瓷的方法与产品特性，挖掘冶金渣制备泡沫陶瓷在保温隔热、吸音降声等领域的巨大潜力。

1 泡沫陶瓷制备方法

近些年已然发展和衍生了很多各具特色的泡沫陶瓷制备方法，其中技术较为成熟的有添加造孔剂法、发泡法、有机泡沫浸渍法、冷冻干燥法和溶胶－凝胶法等。

(1) 添加造孔剂法。添加造孔剂法制备泡沫陶瓷的原理：向陶瓷原料中加入造孔剂，其在坯体中占据一定的空间，并在烧结过程中离开基体而形成气孔[7]。该方法运用较多的无机造孔剂为碳化硅、碳酸钙等，其制备流程图如图 1 所示。

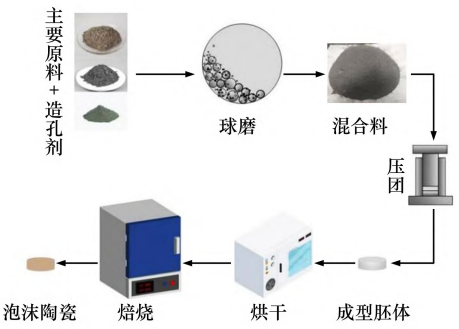


图 1 添加造孔剂法制备泡沫陶瓷流程

Fig. 1 Flow chart of preparing foam ceramics by adding pore-forming agent

此方法的优点是工艺简单、气孔的结构和大小可以控制，但缺点是制备的泡沫陶瓷一般气孔率较低，在 50% 以下。由此方法制备的泡沫陶瓷可用于作过滤器、催化剂载体等。

(2) 发泡法。发泡法是指通过机械发泡、注射发泡、放热反应释放气体、低熔点溶剂蒸发或发泡剂分解等方法使陶瓷悬浮液产生分散的气相进行发泡[9]。此方法适合用于制备闭气孔陶瓷材料，但工艺条件不易控制。由此方法制备的泡沫陶瓷适合用作轻质保温材料。常见的直接发泡法制备泡沫陶瓷的流程如图 2 所示。

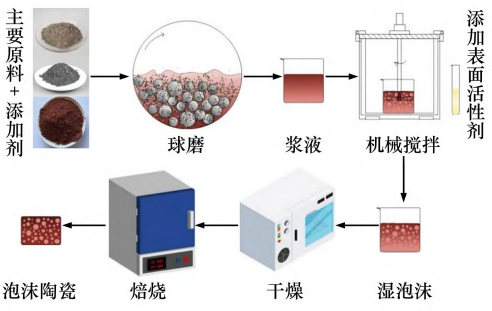


图 2 机械搅拌发泡法制备泡沫陶瓷流程

Fig. 2 Flow chart of preparing foam ceramics by mechanical stirring and foaming method

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）有机泡沫浸渍法。有机泡沫浸渍工艺是将陶瓷浆料浸渍到有机泡沫体上，经成坯、干燥、排塑、烧结等过程制备泡沫陶瓷材料，材料的气孔形状与所用有机泡沫的形状相似[10]。该方法过程易控、制品气孔率较高(一般大于70%)，但缺点是不能制备小闭气孔陶瓷，而且特别注重有机泡沫材料的选择。该方法制备的泡沫陶瓷适合用作金属液过滤器等。

（4）冷冻干燥法。该方法是将陶瓷浆料进行冷处理，使得浆料中的水结成冰，通过控制冰的晶体单向生长，在低压条件下使冰升华排出从而产生孔洞，经煅烧后即可得到泡沫陶瓷[11]。此方法工艺简单易控制，可制备出复杂孔结构的陶瓷且对环境无污染。

（5）溶胶－凝胶法。该方法基于溶胶－凝胶的原理，利用溶胶转化为凝胶的过程中胶体粒子间的堆积空隙，使该堆积空隙经过热处理后形成小气孔来制备泡沫陶瓷[1]。该方法适于制备微孔材料(孔径在纳米级)且气孔分布均匀。但其对原料要求高、工艺条件不易控制。此方法制备的泡沫陶瓷可用作微孔分离膜等。

目前利用冶金渣制备泡沫陶瓷的方法主要为添加造孔剂法和发泡法。由于冶金渣的成分较复杂，这也限制了由冶金渣制备的泡沫陶瓷的应用。目前由冶金渣制备的泡沫陶瓷主要适用于保温隔热和吸音隔声领域，因此添加造孔剂法和发泡法更合适，且制备方法简单适合广泛开展研究。

2　几种典型冶金渣制备泡沫陶瓷的研究现状

冶金渣是指在冶金工业生产过程中产生的各种固体废弃物，主要有炼钢、炼铁产生的钢渣、铬铁渣、镍铁渣和高炉渣等黑色冶金渣，有色金属冶炼过程产生的铜渣、铅渣以及从铝土矿提炼氧化铝产生的赤泥等有色冶金渣。有学者研究表明，以钢渣、高炉渣、赤泥和镍铁渣等冶金渣为主要原料制备的泡沫陶瓷具有良好的综合性能。

2.1　黑色冶金渣制备泡沫陶瓷

2.1.1　钢渣

钢渣种类多样，其包括转炉、电炉炼钢过程排放的钢渣、不锈钢冶炼过程排放的不锈钢钢渣等[9]。钢渣的成分复杂，经适当成分调配即可制备出具有良好性能的泡沫陶瓷。

袁琦等[12]以钢渣作为主要原料，采用直接发泡法成功制备出钢渣泡沫陶瓷。试验采用没食子酸正丙酯增加钢渣颗粒的疏水性，使得钢渣颗粒在气泡之间形成较稳定的构架。钢渣陶瓷泡沫不同阶段的气孔结构如图 3 所示。试验发现：在钢渣质量分数为 40% 时，经1 200 ℃烧成的泡沫陶瓷气孔率较高，可达 70.03%，耐压强度为 3.08 MPa，导热系数较小可以作为保温隔热材料。但其制备过程需要严格控制 pH 值等参数，整体较添加造孔剂法复杂，且对原料要求较高。TANG 等[13]以 94% 的砂页岩和 6% 的钢渣为原料制备的泡沫陶瓷具有 67.22% 的总孔隙率和 0.08 W/(m·K)的导热系数等优良性能，并且微孔之间不连通，属于轻质保温陶瓷材料。但由于采用添加造孔剂法使气孔产生并长大需要适宜的原料粒度、焙烧制度、液相黏度以及造孔剂添加量等因素共同配合，该方法相比于直接发泡法制备的泡沫陶瓷的气孔率低。

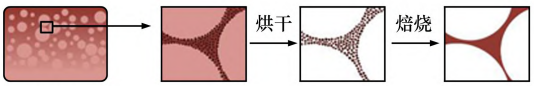


图 3　不同阶段钢渣陶瓷泡沫的气孔结构

Fig. 3　Pore structures of steel slag ceramic foams at different stages

钢渣中含有较高的氧化钙和氧化铁成分，在焙烧过程中极易与原料中质量分数较高的氧化硅生成低熔点物质，适合在较低温度下制备力学能良好的泡沫陶瓷。钢渣含硅量较低，一般添加含硅较高的页岩作为主要原料之一，再通过调节体系内的氧化铁等成分也可适当进行黏度调节，从而实现孔结构的调节。

2.1.2　合金渣

铁合金渣种类多样，包括铬铁渣、硅铁渣和镍铁渣等。随着我国绿色环保意识的不断提

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高，绿色建材市场需求的增大，铁合金渣在新型墙体材料、功能陶瓷等领域的应用备受关注。

陈秋静等[14]以经磁选后的镍铁渣和粉煤灰为主要原料，以聚苯乙烯为发泡剂，制备镍渣基泡沫陶瓷。试验中固定浆料的质量分数为60%，在1 160 ℃下烧结2 h，得到泡沫陶瓷的抗压强度可达0.4 MPa，导热系数可达0.024 W/(m·K)，已达到国家规定的外墙保温泡沫陶瓷的标准。其具有较低的抗压强度以及导热系数，这可能和泡沫陶瓷内部具有较高的闭气孔有关。ZHANG等[15]以镍铁渣和废玻璃粉为主要原料，碳酸钠为造孔剂，硼酸钠作为助熔剂制备泡沫陶瓷。试验结果表明，镍铁渣的加入提高了材料的抗折强度和孔隙结构的均匀性。

由于镍铁渣中含有较多的氧化钙、氧化镁和氧化铁成分，使得制品中易存在辉石相，从而提高陶瓷的抗折强度[16]。因此镍铁渣适合用于制备应用于力学性能要求较高的场所的泡沫陶瓷。

2.1.3 高炉渣

高炉渣为高炉炼铁过程中产生的固废，目前我国高炉渣主要用于作建筑材料或铺路材料，其余则堆放存储或丢弃，该做法造成严重的资源浪费和环境污染。

梁宗余等[17]经试验探索出15%含钛高炉渣、62%页岩为主要原料，在1 070 ℃下烧结制备出轻质泡沫陶瓷产品。在试验探索出的最佳条件下制备出的泡沫陶瓷具有良好的综合性能，其体积密度为0.316 g/cm^3，导热系数为0.15 W/(m·K)，属于轻质多孔材料。一定量的TiO_2的存在可以促进烧结，反之则会对烧结起阻碍作用[18]，因此对于含钛原料制备泡沫陶瓷，应注意氧化钛的质量分数。陶盛恺等[19]研究了以高炉渣和粉煤灰为主要原料，通过正交试验研究发现造孔剂种类相比烧结温度对泡沫陶瓷孔隙率的影响更显著。试验中探索出最佳条件下制得的泡沫陶瓷具有高达66.3%的气孔率。

一般用高炉渣制备泡沫陶瓷需要添加含氧化硅较高的原料，以达到泡沫陶瓷适宜的原料配比，从而实现在较低焙烧温度下制备性能良好的泡沫陶瓷。

2.2 有色冶金渣制备泡沫陶瓷

铜渣、赤泥等有色冶金渣中含有砷、铅和镉等重金属成分，且铁氧化物质量分数较高，同时含有氧化钙、氧化硅等氧化物。有色冶金渣中赤泥占比较大，且我国主要以拜耳法赤泥为主，其碱度较高，一般pH值在9以上[20]，成分较复杂，主要化学成分[21]如表1所示。由于赤泥中含有氧化硅、氧化铝等成分适合用于制备泡沫陶瓷，因此有人对此进行了研究。

HOU等[22]以赤泥和粉煤灰为主要原料，以硼酸钠作为助熔剂，淀粉和MnO_2作为造孔剂，制备出体积密度为0.59~0.96 g/cm^3、孔隙率为41.82%~63.51%、抗压强度为4.22~8.38 MPa的泡沫陶瓷。由于采用添加造孔剂法，其气孔率不高，因此拥有良好的强度和体积密度，可用于作建筑隔墙板等。XIA等[23]以赤泥和钾长石洗渣为主要原料，SiC作为造孔剂，在1 080~1 120 ℃的高温下采用添加造孔剂法制备了泡沫陶瓷。试验发现除原材料中残留的一些物相外，还有新的物相生成，包括金红石和钙长石。样品经1 100 ℃、60 min烧成后其表观孔隙率和抗压强度分别为61.89%和3.64 MPa。其优异的多孔结构和力学性能，适用于建筑隔墙的保温材料或装饰材料。含有赤铁矿相的拜耳法赤泥的加入，会使得在较低温度下焙烧时，依旧存在赤铁矿相。这主要是因为在1 300 ℃以下且空气气氛中焙烧，赤铁矿可认为不参加反应。Fe_2O_3开始分解温度和氧分压的关系如表2所示[16]。

综上所述，由冶金渣为主要原料之一可以制备出具有良好气孔率、较高抗压强度和较低导热系数的泡沫陶瓷。其经气孔结构调整可以用作隔音材料，同时也可在保温隔热方面具有很好的应用。但冶金渣制备泡沫陶瓷也存在一些问题，如以添加造孔剂法为主制备的泡沫陶瓷的气孔率有待提高，且其孔径难以实现可控。而发泡法一般制备的泡沫陶瓷气孔率高，但强度较差且工艺条件不易控制，且对原料要求较

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　国内不同地区拜耳法赤泥主要化学成分（质量分数）

Table 1　Main components of red mud from different regions in China　%

地区	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	Na_2O
贵州遵义	21.46	19.80	18.69	19.37	6.21	8.41
河南郑州	20.38	12.86	9.48	24.50	2.92	11.46
广西平果	8.35	18.05	31.26	18.49	6.18	3.23
山西原平	16.78	26.83	26.04	16.85	4.13	6.32
山东淄博	8.88	0.86	47.39	22.38	7.33	12.76
山西阳泉	19.10	13.30	15.70	23.40	4.40	9.40

表 2　Fe_2O_3 开始分解温度和氧分压的关系

Table 2　The relationship between the decomposition temperature of Fe_2O_3 and the partial pressure of oxygen　%

氧分压/atm	0.001	0.010	0.050	0.100	0.210	0.300
分解温度/℃	1 203	1 278	1 334	1 360	1 389	1 403

高。总之，影响陶瓷制品的因素较多，还需更加深入具体地探索得出系统性结论，而且不同原料的化学成分不同，会导致制备方法和参数变化。因此，探究性能影响因素以制备出气孔分布均匀且孔径和物相可控的泡沫陶瓷尤为重要。

3　冶金渣制备泡沫陶瓷存在的主要问题

由于冶金渣种类和配比不同，并且制备工艺和参数不同会导致泡沫陶瓷的主要物相不同，所制成的泡沫陶瓷性能及适用范围也会有所差异。不同冶金渣制备泡沫陶瓷的原料及烧结温度和性能差异等如表 3 所示。查阅文献可知，对比其他冶金渣，采用赤泥制备泡沫陶瓷的烧结温度普遍较低，且更易制备出孔径较大(多为毫米级)，强度良好(>2 MPa)，孔隙率较高(>60%)但孔径分布不均匀的泡沫陶瓷。这可能是由于赤泥中氧化钠质量分数较高以及原料中配入适量的硼酸钠等助熔剂，使得体系在焙烧过程中黏度大大降低，更有利于气泡生成和长大。但先后生成的气泡大小不一，且相邻的气泡之间存在压强差，会使得制品气孔和孔径分布不均匀。在其他冶金渣制备泡沫陶瓷的体系中，若存在不适量的助熔剂，同样也容易出现气泡分布不均匀的情况。由此会导致孔壁厚薄不均、不同区域力学性能和隔热性能差异较大的情况，且孔径难以控制，影响制品的性能和应用。另外，不同的原料具有不同的特性和组成，这些均会对泡沫陶瓷的物相组成和性能等产生影响，如钢渣、镍铁渣本身密度大，其过多使用会使得泡沫陶瓷的密度较大且气孔分布较差。一方面由于密度较大，原料在发泡过程中易出现沉积现象而导致气孔分布不均，另一方面较大密度原料过多添加会增加气泡长大的阻力，从而减小体积膨胀而增大制品的密度。以高炉渣、钢渣等含氧化钙高的原料以低于 1 200 ℃的温度烧结制备的泡沫陶瓷的主要物相包括透辉石；以镍铁渣(氧化镁较高，主要含橄榄石类)的原料在1 100 ℃左右烧结制备的泡沫陶瓷的主要物相包含镁橄榄石和顽辉石；以拜耳法赤泥和粉煤灰为原料制备的泡沫陶瓷的主要物相包括钙长石、赤铁矿等。而不同的陶瓷物相具有不同的特性，如钙长石导热系数低但抗压强度也较低，但固结 Na^+ 效果较好[16] 等。可见泡沫陶瓷原料对陶瓷物相、烧结温度和制品性能均有较大的影响。

通过查阅文献发现，制备泡沫陶瓷的焙烧温度普遍偏低，因而原料中部分物相并未参加反应，也会对制品的导热系数和密度等产生影响。研究者大多研究了造孔剂粒度对发泡过程的影响，但原料粒度过大或粒度分布不均匀有碍于焙烧过程的充分反应。然而鲜有人关注原料特性，如物相组成、粒度等对泡沫陶瓷烧结温度、物相、孔径分布和性能等的影响，以及从物相调控出发利用冶金渣制备物相可控的泡沫陶瓷制品。另外，冶金渣多含有 Cr、Mn、Na 等有毒有害元素，而目前大多忽略了 Na、K、Cl、Mn 和 Ni 等元素的固化。

另外目前关于泡沫陶瓷在不同领域的使用标准较少，且由冶金渣制备的泡沫陶瓷杂质较多，一方面限制了泡沫陶瓷的工业化使用，另一

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 制备泡沫陶瓷的原料、烧结温度及产品性能差异

Table 3 Differences in raw materials, sintering temperatures and final properties of preparing foamed ceramics

主要原料	烧结温度/℃	主要物相	气孔率/%	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	抗压强度/MPa	参考文献
SS质量分数为40%,没食子酸正丙酯质量分数为1.5%~2.0%	1 200	—	70.03	—	3.08	12
页岩、SS、菱镁矿、SiC配比为91∶6∶3∶0.2	1 150	石英、方石英、透辉石	59.03(闭气孔率)	—	10.86	24
SS、偏高岭土配比为60∶40	1 190	钙长石	81.03(真气孔率)	—	0.50	25
SS、滑石、SiO_2、硼酸、SiC配比为53∶34∶13∶5∶(5~10)	1 050~1 150	透辉石	16.84~53.13(闭气孔率)	—	4.26~13.86	26
SS、砂页岩、SiC配比为6∶94∶0.2	1 130	石英、方石英、透辉石、钙铁辉石	55.27(闭气孔率)	0.080	29.98	13
BFS、页岩、SiO_2、黏土、SiC配比为15∶62∶12.5∶10.5	1 070	斜长石、石英、辉石	—	0.150	—	17
BFS、页岩、硼砂、SiC配比为30∶70∶4∶0.2	1 090	斜长石、石英、透辉石	—	0.121	2.59	27
FNS、FA配比为7∶3	1 160	镁橄榄石、顽辉石、斜顽辉石、镁铝尖晶石	—	0.024	0.40	14
FA、废玻璃粉、Na_2CO_3、硼砂配比为20∶80∶7∶5	850	辉石、钠长石	80.06	—	—	15
FNS、偏高岭土、废玻璃粉、SiC配比为50∶40∶10∶0.8	1 100	顽辉石、蓝宝石、堇青石、镁橄榄石	89.8	—	1.17	28
FNS、高岭土配比为1∶1,秸秆灰、Na_2CO_3	1 100	镁橄榄石、尖晶石	86.71(闭气孔率)	—	3.27	29
RM、FA、淀粉质量分数为1%~15%、MnO_2质量分数为1%~15%	1 000	钠辉石、赤铁矿、假辉锑矿、金红石	41.82~63.51	—	4.22~8.38	22
RM、钾长石洗渣配比为1∶1	1 100	金红石和钙长石	61.89	—	3.64	23
FA、RM、硼砂配比为16∶4∶5,铅锌尾矿	980	赤铁矿、蓝方石、硬石膏、钠长石	69.20	—	7.00	30
RM、FA、硼砂、Na_2SiO_3配比为(40~50)∶(26.25~40)∶(15~20)∶5	900	蓝方石、钙铁榴石、霞石	64.14~74.15	—	4.04~10.63	31
RM、建筑垃圾、抛光砖废料、高岭土、发泡剂配比为35∶20∶20∶20∶5	1 100	石英、硅酸锆、斜辉石、钙长石	73.28	—	7.83	32
RM、FA、钠长石钾长石、SiC配比为18∶42∶35∶5	1 200	钙长石、石英、莫来石	70.00	0.340	—	33

注:SS为钢渣,BFS为高炉渣,FNS为镍铁渣,FA为粉煤灰,RM为赤泥。

方面不能为泡沫陶瓷的进步和发展提供前提和依据。而且冶金渣制备的泡沫陶瓷仍存在导热系数较高、使用寿命较短等问题,这些问题的改进主要依赖于改善气孔分布、孔径大小以及调控

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制品物相等方面。同时，冶金渣化学成分复杂且波动大，目前研究的适宜制备泡沫陶瓷的参数仅针对固定原料在微小变化范围内使用，即对原料要求苛刻，无法实现不同种类冶金渣制备性能良好的泡沫陶瓷体系，这就使冶金渣制备泡沫陶瓷的发展面临着巨大障碍。

总的来说，冶金渣制备泡沫陶瓷的研究意义重大，但也面临着不少的问题，针对这些问题进行深入研究，以制备出适合工业化生产且性能优良的泡沫陶瓷，不仅对环境友好也实现了节能降耗。

4　结论与展望

本文从原料种类与陶瓷性能差异出发，通过对比不同冶金渣制备泡沫陶瓷的主要物相、气孔率及导热系数等，得出以下结论。

(1)以冶金渣为主要原料，可以制备具有良好综合性能的泡沫陶瓷，但制品的孔径及其分布难以控制，如何制备孔径可控、气孔分布均匀的泡沫陶瓷将是冶金渣制备泡沫陶瓷的焦点。

(2)冶金渣原料性质及成分对泡沫陶瓷制备过程和产品性能有较大影响，同时原料中 Na、K、Mn、Cr 等具有潜在危害的元素在制备过程中的走向和固化机理，以及制品的浸出毒性也是目前研究需要重点关注的问题。

(3)以冶金渣为主要原料制备泡沫陶瓷，可以在实现废物资源化的同时保护环境，并且得到高附加值的产品。利用冶金渣制备泡沫陶瓷产品，具有良好的应用前景和重要的意义。

参考文献：

[1] 王敏. 直接发泡法制备结构可控泡沫陶瓷[D]. 天津：天津大学，2012.
WANG Min. Direct foaming method prepared ceramic foams with controlled structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[2] 陈新亮. 泡沫陶瓷板在工程中的应用[J]. 建材技术与应用，2021(3)：32－34.
CHEN Xinliang. Application of foam ceramic plate in engineering[J]. Building Materials Technology and Application, 2021(3):32－34.

[3] 赵瑾，毛小建，王士维. 直接发泡法制备孔特性可控的氧化铝泡沫陶瓷[J]. 硅酸盐学报，2019，47(9)：1222－1234.
ZHAO Jin, MAO Xiaojian, WANG Shiwei. Alumina ceramic foams with controllable cell structure prepared by direct foaming[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(9):1222－1234.

[4] 黄永亮. 莫来石轻质材料的制备与性能研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2015.
HUANG Yongliang. Preparation and performance of mullite lightweight materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.

[5] 高赛生态，张永锋，王敏建. 莫来石泡沫陶瓷浆料性能研究[J]. 中国陶瓷，2017，53(4)：75－80.
GAO Saishengtai, ZHANG Yongfeng, WANG Minjian. Study on property of slurry for mullite foam ceramic [J]. China Ceramics, 2017, 53(4):75－80.

[6] 杨晋鹏. 碳化硅质泡沫陶瓷过滤器生产工艺对产品性能的影响[J]. 山东陶瓷，2021，44(6)：7－10.
YANG Jinpeng. Effect of production process of SiC foam ceramic filter on product performance [J]. Shandong Ceramics, 2021, 44(6):7－10.

[7] 杨秋婷，史阳. 泡沫陶瓷的研究现状和发展前景[J]. 佛山陶瓷，2009，19(4)：40－43.
YANG Qiuting, SHI Yang. Research status and development prospect of foam ceramics [J]. Foshan ceramics, 2009, 19(4):40－43.

[8] 李宇，刘月明. 我国冶金固废大宗利用技术的研究进展及趋势[J]. 工程科学学报，2021，43(12)：1713－1724.
LI Yu, LIU Yueming. Progress and trend of bulk utilization technology of metallurgical solid wastes in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12):1713－1724.

[9] 杜斌，刘福田，张铭霞，等. 双氧水发泡法制备泡沫陶瓷外墙保温板[J]. 山东陶瓷，2013，36(2)：8－12.
DU Bin, LIU Futian, ZHANG Mingxia, et al. Preparation of ceramic foam exterior wall insulation board by hydrogen peroxide foaming method[J]. Shandong Ceramics, 2013, 36(2):8－12.

[10] 徐勇，邹国荣. 泡沫陶瓷制备工艺研究进展[J]. 耐火材料，2017，51(5)：358－365.
XU Yong, ZOU Guorong. Research progress on preparation technology of foam ceramics[J]. Refractories, 2017, 51(5):358－365.

[11] 梁永仁，罗艳妮，杨志懋，等. 多孔陶瓷及其制备方法研究进展[J]. 绝缘材料，2006，39(2)：60－64.
LIANG Yongren, LUO Yanni, YANG Zhimao, et al. Porous ceramic and its progress of preparations[J]. Insulating Materi-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

als,2006,39(2):60 – 64.

[12] 袁琦,郑玉,李志辉,等. 颗粒稳定泡沫法制备钢渣泡沫陶瓷[J]. 硅酸盐通报,2020,39(10):3334 – 3339.
YUAN Qi,ZHENG Yu,LI Zhihui,et al. Steel slag foamed ceramics prepared by particle-stabilized foaming method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(10):3334 – 3339.

[13] TANG Zijuan,LIANG Jian,JIANG Weihui,et. al. Preparation of high strength foam ceramics from sand shale and steel slag [J]. Ceramics International,2020,46(7):9256 – 9262.

[14] 陈秋静,吴其胜,黄子宸,等. 镍冶金废渣制备多孔陶瓷及其性能[J]. 材料科学与工程学报,2021,39(1):111 – 116;146.
CHEN Qiujing,WU Qisheng,HUANG Zichen,et al. Preparation and properties of porous ceramics from nickel metallurgical waste slag[J]. Journal of Materials Science and Engineering,2021,39(1):111 – 116;146.

[15] ZHANG Changsen,WANG Xu,ZHU Huajun,et al. Preparation and properties of foam ceramic from nickel slag and waste glass powder [J]. Ceramics International,2020,46(15):23623 – 23628.

[16] 裴德健. 利用冶金渣制备硅钙基多元体系陶瓷的机理及应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2019.
PEI Dejian. Study on mechanism and application of Si-Ca multicomponent ceramics prepared from metallurgical slags[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2019.

[17] 梁宗宇,张华,马明龙,等. 烧成工艺制度对含钛高炉渣制备发泡陶瓷性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2020,39(5):1627 – 1632.
LIANG Zongyu,ZHANG Hua,MA Minglong,et al. Effect of firing process system on performance of foamed ceramic prepared by titanium-bearing blast furnace slag[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2020,39(5):1627 – 1632.

[18] 于志,李淼,高金星,等. TiO_2 在耐火材料中的研究与应用进展[J]. 耐火材料,2021,55(5):390 – 394.
YU Zhi,LI Miao,GAO Jinxing,et. al. Research and application progress of TiO_2 in refractories[J]. Refractories,2021,55(5):390 – 394.

[19] 陶盛恺,李宇梁,于庆波. 以高炉渣为主要原料制备发泡陶瓷的实验研究[C]//2020年全国冶金能源环保技术交流会会议文集. 唐山:中国金属学会,2020:360 – 364.
TAO Shengkai,LI Yuliang,YU Qingbo. Experimental study on preparation of foamed ceramics with furnace slag as main raw material[C]//Proceedings of 2020 National Metallurgical Energy Environmental Protection Technology Exchange Conference. Tangshan:The Chinese Society for Metals,2020:360 – 364.

[20] 顾汉念,郭腾飞,马时成,等. 赤泥中铁的提取与回收利用研究进展[J]. 化工进展,2018,37(9):3599 – 3608.
GU Hannian,GUO Tengfei,MA Shicheng,et al. Review on separation,recovery,extraction and comprehensive utilization of iron from red mud[J]. Chemical Industry Progress,2018,37(9):3599 – 3608.

[21] 罗丹,苟丹,李紫龙,等. 赤泥中铁回收利用技术研究进展[J]. 科技创新与应用,2022,12(1):138 – 139;143.
LUO Dan,GOU Dan,LI Zilong,et al. Research progress on recycling technology of iron from red mud[J]. Science & Technology Innovation and Application,2022,12(1):138 – 139;143.

[22] HOU Lijun,LIU Taoyong,LU Anxian. Red mud and fly ash-based ceramic foams using starch and manganese dioxide as foaming agent[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2017,27(3):591 – 598.

[23] XIA Fan,CUI Shicai,PU Xipeng. Performance study of foam ceramics prepared by direct foaming method using red mud and K-feldspar washed waste [J]. Ceramics International,2021,48(4):5197 – 5203.

[24] 唐紫娟,梁健,江伟辉,等. 硼砂对泡沫陶瓷结构和性能的影响(英文)[J]. 陶瓷学报,2021,42(1):63 – 68.
TANG Zijuan,LIANG Jian,JIANG Weihui,et al. Effect of borax on structure and properties of foam ceramics[J]. Acta Ceramics Sinica,2021,42(1):63 – 68.

[25] 黄子宸. 利用冶金钢渣制备多孔陶瓷材料的开发与研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
HUANG Zichen. Development and research on preparation of porous ceramic materials by metallurgical steel slag[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2021.

[26] 郭伟,蒋金海,李琦,等. 钢渣制备透辉石多孔陶瓷的研究[J]. 江苏建材,2020(1):5 – 8.
GUO Wei,JIANG Jinhai,LI Qi,et al. Study on preparation of diopside porous ceramics by steel slag[J]. Jiangsu Building Materials,2020(1):5 – 8.

[27] 李嘉昊,梁宗宇,杨合,等. 以硼砂为助熔剂使用含钛高炉渣制备发泡陶瓷[J]. 硅酸盐通报,2021,40(12):4077 – 4083;4101.
LI Jiahao,LIANG Zongyu,YANG He,et al. Foamed ceramics prepared by titanium-bearing blast furnace slag with borax as flux agent[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2021,40(12):4077 – 4083;4101.

[28] WU Qisheng,CHEN Qiujing,HUANG Zichen,et al. Preparation and characterization of porous ceramics from nickel smelting slag and metakaolin[J]. Ceramics International,2020,46(4):4581 – 4586.

(下转第122页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] 叶国华. 从含钒钢渣中提取 V_2O_5 的新工艺与机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
YE Guohua. Research on the new technology and mechanism of V_2O_5 extraction from vanadium-bearing steel slag[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.

[3] 王滢. 钠化提钒废渣资源化利用制备铬铁合金研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.
WANG Ying. Study on resource utilization of sodium vanadium extraction waste residue to prepare ferrochromium alloy[D]. Shengyang: Northeastern University, 2019.

[4] 刘红盼,倪海涛,段亨攀,等. 工业固废资源化过程中组分"分离-转化-定向制备"研究进展[J]. 化学通报,2022,85(4):452-459.
LIU Hongpan, Ni Haitao, Duan Hengpan, et al. Research progress of component "separation-transformation- directed preparation" in the process of industrial solid waste recycling[J]. Chemistry, 2022, 85(4): 452-459.

[5] 侯静,吴恩辉,李军. 提钒尾渣的综合利用研究现状及进展[J]. 矿产保护与利用,2017(6):103-108.
HOU Jing, WU Enhui, LI Jun. Research status and progress of comprehensive utilization of vanadium extraction tailings[J]. Mineral Protection and Utilization, 2017(6): 103-108.

[6] 谢鸿智,宁寻安,邱国强,等. 木屑生物质热解制备高还原性气体机理[J]. 环境工程学报,2022,16(5):1639-1648.
XIE Hongzhi, NING Xunan, QIU Guoqiang, et al. Mechanism of pyrolysis of sawdust biom-ass to produce highly reductive gas[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(5): 1639-1648.

[7] 田宜水,单明,孔庚,等. 我国生物质经济发展战略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(1):133-140.
TIAN Yishui, SHAN Ming, KONG Geng, et al. Research on the development strategy of biomass economy in China[J]. Chinese Engineering Science, 2021, 23(1): 133-140.

[8] 卜庆洁,罗思义,马晨,等. 生物质焦油还原多孔铁矿粉试验研究[J]. 钢铁研究,2015,43(2):1-4;13.
BU Qingjie, LUO Siyi, MA Chen, et al. Experimental study on reduction of porous iron ore powder with biomass tar[J]. Steel Research, 2015, 43(2): 1-4; 13.

[9] 李恒,刘晓明,赵喜彬,等. 生物质松木锯末中低温还原高铁拜耳法赤泥[J]. 工程科学学报,2017,39(9):1331-1338.
LI Heng, LIU Xiaoming, ZHAO Xibin, et al. Reduction of high iron Bayer red mud by biomass pine sawdust at medium and low temperature[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2017, 39(9): 1331-1338.

[10] 李理,张润虎,贾黎春,等. 生物质干法解毒铬渣的实验研究[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2013(1):1-5.
LI Li, ZHANG Runhu, JIA Lichun, et al. Experimental study on detoxification of chromium residue by biomass dry process [J]. Journal of Kunming Metallurgical College, 2013(1): 1-5.

[11] 董文召,韩锁义,徐静,等. 花生壳研究现状与应用前景分析[J]. 中国农学通报,2019,35(32):14-19.
DONG Wenzhao, HAN Suoyi, XU Jing, et al. Research status and application prospect of peanut shell[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(32): 14-19.

[12] ERDOS E, RAHMEL A, SCHORR M, et al. The identification of the sulfide $NaCrS_2$ in nickel-base superalloys during corrosion in sulfate melts[J]. Oxidation of Metals, 1982, 18: 188-192.

(上接第30页)

[29] 蒋金海,李琦,陈艳,等. 镍渣制备轻质镁橄榄石-尖晶石闭孔泡沫陶瓷及分形表征[J]. 中国陶瓷,2018,54(7):47-52.
JIANG Jinhai, LI Qi, CHEN Yan, et al. Preparation and fractal characterization of lightweight forsterite-spinel based closed-cell foam ceramics with nickel slag [J]. China Ceramics, 2018, 54(7): 47-52.

[30] LIU Taoyong, TANG Yu, LI Zhuo, et. al. Red mud and fly ash incorporation for lightweight foamed ceramics using lead-zinc mine tailings as foaming agent[J]. Materials Letters, 2016, 183: 362-364.

[31] CHEN Xingjun, LU Anxian, QU Gao. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent[J]. Ceramics International, 2013, 39(2): 1923-1929.

[32] 王清涛,李森,于华芹,等. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报,2018,37(4):1393-1398.
WANG Qingtao, LI Sen, YU Huaqin, et al. Preparation of lightweight high-strength thermal insulation and decoration integration building materials using red Mud as raw materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramics, 2018, 37(4): 1393-1398.

[33] 丁祥,潘凯凯,彭波,等. 熔融发泡法制备赤泥-高铝粉煤灰基多孔陶瓷[J]. 硅酸盐学报,2022,50(3):713-722.
DING Xiang, PAN Kaikai, PENG Bo, et al. Preparation of porous ceramics with red mud and high-aluminum fly ash by melting foaming method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(3): 713-722.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net