



移动扫码阅读

王文龙,教授,博导,山东大学新泰工业技术研究院院长,能源与动力工程学院副院长。兼任燃煤污染物减排国家工程实验室副主任、山东省固废绿色材料工程实验室主任、山东省新泰市科技副市长(挂职)等职务。国家重点研发计划首席科学家,入选国家万人计划科技创新领军人才、教育部新世纪优秀人才、山东省杰青、中英创新领军人才等人才计划。创办了《Green Energy and Resources》(绿色能源与资源)英文国际期刊并担任执行主编。主要从事绿色能源开发利用与绿色资源低碳转化研究,发展了多源固废协同互补-定向矿化-两级跃迁制备硫铝铁系绿色材料的技术体系并实现了产业化。主持国家重点研发计划项目2项、国家自然科学基金3项、国家863计划1项及牛顿基金中英IAPP国际合作项目、山东省重大基础研究计划项目、山东省重大创新工程项目等各类项目30余项。获国家技术发明二等奖、山东省自然科学二等奖、山东大学首届十大高价值应用科技成果奖、中国循环经济协会科学技术一等奖等8项。在《Advanced Materials》《Advanced Functional Materials》《Nano Energy》《Chemical Engineering Journal》等期刊发表论文180余篇;授权国家发明专利70余件,PCT国际专利10件;推动制定各类标准10项;培养博士后、博士生、硕士生、留学生50余人。

吴长亮,王文龙,王旭江,等.煤矸石在建材领域的资源化研究现状及创新利用策略[J].能源环境保护,2023,37(1):167-177.

WU Changliang, WANG Wen long, WANG Xujiang, et al. Research status and innovative utilization strategy of coal gangue resource in building material field[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 167-177.

## 煤矸石在建材领域的资源化研究现状及创新利用策略

吴长亮<sup>1,2,3</sup>,王文龙<sup>1,2,3,\*</sup>,王旭江<sup>1,2,3</sup>,李敬伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 燃煤污染物减排国家工程实验室, 山东 济南 250061; 3. 山东省固废绿色材料工程实验室, 山东 济南 250061)

**摘要:**煤矸石作为我国排放量最大的工业固废,目前累积堆存量超过70亿t。煤矸石的堆存和排放占用大量土地,污染土壤、空气和水体,造成极大的生态环境影响。当前我国煤矸石综合利用具有利用率偏低、产品单一、性能差,且大规模与高附加值难兼容等特点,现有煤矸石无害化与资源化综合利用的规模和能力明显不能满足国家对生态环境保护及“双碳”目标下对碳减排的现实要求。为推动煤矸石综合利用技术发展,本文阐述了煤矸石的成分与理化特性,从煤矸石制水泥、混凝土骨料和墙体材料等方面重点介绍了煤矸石在建材领域的资源化应用现状,其次从重金属浸出、粉尘及气体污染分析了煤矸石对生态环境的影响,最后在此基础上提出了煤矸石协同互补及两级迭代利用的创新策略及一些建议和展望。

**关键词:**煤矸石;建材;环境影响;综合利用

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)0167-11

### Research status and innovative utilization strategy of coal gangue resource in building material field

WU Changliang<sup>1,2,3</sup>, WANG Wenlong<sup>1,2,3,\*</sup>, WANG Xujiang<sup>1,2,3</sup>, LI Jingwei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
2. National Engineering Laboratory for Reducing Emissions from Coal Combustion, Jinan 250061, China;  
3. Shandong Engineering Laboratory for Solid Waste Green Materials, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Coal gangue has been the biggest industrial solid waste discharged in our country, with the cumulative stockpile of more than 7 billion tons. The accumulation and discharge of coal gangue occupy a large amount of land, pollute the soil, air and water, and has caused a great ecological environment

收稿日期:2022-11-25;责任编辑:蒋雯婷

DOI:10.20078/j.eep.20230112

基金项目:山东省重点研发计划(2020CXGC011403);国家重点研发计划(2020YFC1910000)

作者简介:吴长亮(1990—),男,山东菏泽人,博士研究生,研究方向为固废基生态混凝土的研究及应用。E-mail: changliang.wu@foxmail.com

通讯作者:王文龙(1976—),男,山东滨州人,博士,教授,研究方向为绿色资源低碳转化与绿色能源开发利用。E-mail: wwenlong@sdu.edu.cn

impact. Currently, the comprehensive utilization of coal gangue in our country has the characteristics of low utilization rate, single product, poor performance, and difficult compatibility between large-scale and high added value. The scale and ability of existing coal gangue harmless and comprehensive utilization of resource can not meet the country's practical requirement for the ecological environment protection and "double carbon" target on carbon emission reduction. In order to promote the development of comprehensive utilization technology of coal gangue, in this paper, the composition and physical and chemical characteristics of coal gangue were described, and the application status of coal gangue resource in the field of building materials was discussed including coal gangue making cement, concrete aggregate and wall materials. Secondly, the influence of coal gangue on ecological environment was analyzed from the aspects of heavy metal leaching, dust and gas pollution. Finally, on this basis, the innovative strategies of collaborative complementation and two-stage iterative utilization of coal gangue as well as some suggestions and prospects were put forward.

**Keywords:** Coal gangue; Building materials; Environmental impact; Comprehensive utilization

## 0 引言

煤炭资源作为地球储量最丰富、分布地域最广的化石燃料是世界各国使用的主要能源之一。国际能源署日前发布预测,2022年全球煤炭消费量将达到约80亿t,维持平稳小幅增长态势。中国具有“富煤贫油少气”资源禀赋特点形成了自身“以煤为主”的能源结构<sup>[1]</sup>。据国家统计局数据,2021年我国煤炭消费占一次能源消费的56%左右,同时煤炭也是能源消费碳排放的主要来源,煤炭利用产生的二氧化碳排放量约占能源消费排放70%左右<sup>[2]</sup>。虽然在“双碳”背景下,我国持续优化能源结构,逐步降低煤炭在能源结构中的消费占比,但鉴于煤炭在经济社会发展中所占据的主导地位,未来很长时间内中国仍然是世界第一煤炭生产国和消费国。

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中的副产物,排放量约占原煤产量的10%~15%,是中国目前排放量最大的工业固废。随着我国经济发展规模的扩大和对能源需求的不断增长,煤矸石占煤炭产量的比例呈不断上升趋势,煤矸石的数量在迅速增加<sup>[3]</sup>。据不完全统计,目前我国煤矸石累计堆存量超过70亿t,形成矸石山超过2000座,占地150 km<sup>2</sup>,并仍在以每年3.0亿~3.5亿t的速度增长<sup>[4]</sup>。根据《2021—2022年中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告》测算的数据,2021年煤矸石产生量约为7.43亿t,增长5.84%,增幅明显,综合利用率为73.1%,较去年同比增长0.9%。虽然近年来中国煤矸石的利用率有了很大提高,但与煤矸石的产量相比,其利用率仍然不足,而且相对欧美发达国家超过90%的综合利用率而言还有较大差距<sup>[5]</sup>。历年煤矸石产生量、利用量情况见图1。

此外,煤矸石作为固、液、气三害俱全的工业废料,它的长期堆放不仅浪费了资源,侵占了大量的土地,而且污染了水源、土壤和周围的空气。在堆积过程中,热量不断积累,随着煤矸石氧化而发生自燃,向大气中释放大量SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO等有害气体,据统计,中国近1/3的矸石山已经完成自燃或正经历自燃状态<sup>[6]</sup>。煤矸石长期受到地表水和地下水的浸泡,存在有害元素的浸出风险,污染周围的生态系统,通过生物积累危害人类。此外,煤矸石的无序堆积可能引发泥石流、滑坡等严重的地质灾害,威胁周围的生态环境和生命财产安全。因此,发展煤矸石综合利用,消除其对生态环境的负面影响是一项紧迫的任务。

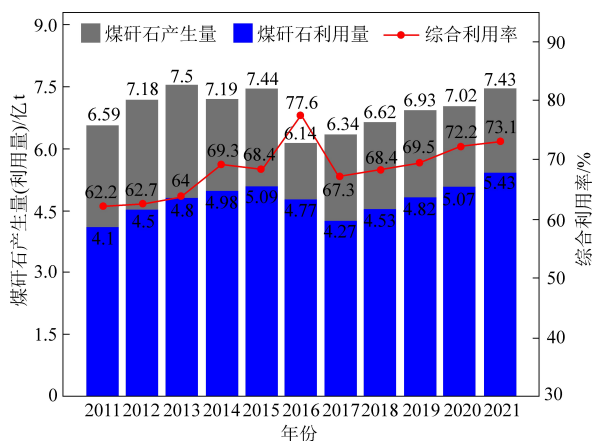


图1 2011—2021年煤矸石产生量及利用率

Fig. 1 Coal gangue production and utilization rate from 2011 to 2021

煤矸石的综合处置途径多样,主要集中在筑路、采矿区回填、土地复垦、煤矸石发电和生产建材产品等方面。如图2所示,2020年,我国煤矸石综合利用量5.07亿t,占总产量的72%<sup>[7]</sup>,其中有2.78亿t用于采空区回填、筑路及土地复垦(55%),1.5亿t用于煤矸石发电(30%),6 000万t应用于建材生产(12%),1 500万t用于有价元素提取和生产化工产品(3%)<sup>[8]</sup>。在建筑领域,煤矸石被用来制备水泥、混凝土骨料及墙体材料等,国家发改委等多部门联合发布的《煤矸石综合利用管理办法(2014年修订版)》中强调将煤矸石发

电、生产建材、回填和无害化处理作为主攻方向,鼓励发展高科技含量、高附加值的煤矸石综合利用技术和产品<sup>[9]</sup>。2021发布的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中也对煤矸石在制备高掺量、高附加值绿色建材领域的综合利用指明了方向。随着煤矸石综合利用产品在建筑建材领域的应用占比提高,研发积极性保持高涨,本文针对近年煤矸石在建材领域的研究进展及环境影响进行了探讨,并在此基础上提出一些建议,这些发现将有助于进一步了解煤矸石目前的利用情况,并发现潜在的研究领域。

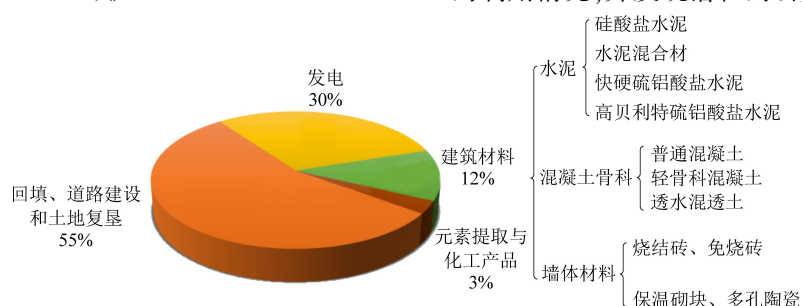


图2 煤矸石综合利用情况

Fig. 2 Comprehensive utilization of coal gangue

## 1 煤矸石化学组成与矿物相

煤矸石作为与煤层伴生的沉积岩,主要由炭质页岩、泥岩、砂岩及煤炭等物质组成,颜色从灰色到灰褐色和棕黑色不等,比煤坚硬,表面多粘附细颗粒煤泥,煤矸石的硬度约为3 Mohs,抗压强度根据风化程度不同在300~4 700 Pa之间,颗粒密度在2 100~2 900 kg/m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>。煤矸石自燃后由于氧化铁含量的不同,颜色会发生灰白色、黄白色或红色的变化,自燃后的煤矸石颗粒密度、碳含量和烧失量均有所下降并伴随着内部高孔隙度和疏松的结构。

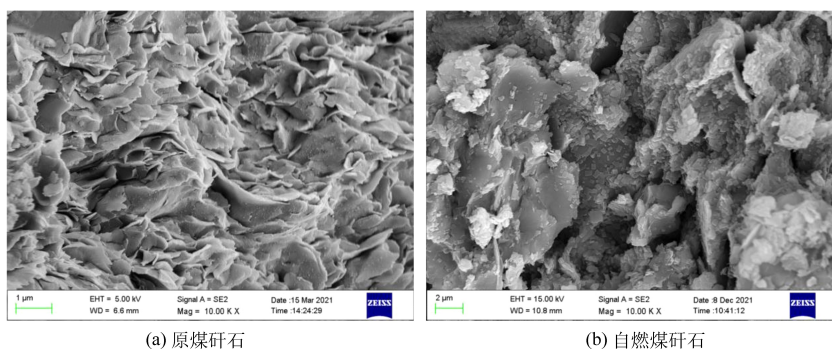
不同区域煤矸石组分差异大(见表1),我国

主要产煤省份(2021年,内蒙古、山西、陕西、山东、新疆等9个煤炭主产省份新产生煤矸石6.32亿t,占全国年新增总产生量的85.18%)煤矸石的主要成分普遍含有较高的SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,大部分地区SiO<sub>2</sub>的质量分数在30%~70%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的质量分数在10%~40%,SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量超过70%,意味着煤矸石具备潜在火山灰活性<sup>[20-21]</sup>。煤矸石的主要矿物相组成包括黏土矿物、石英、方解石等,黏土矿物主要是高岭土、伊利石、蒙脱石(如图4)。微观结构上煤矸石表现出层状结构的高岭石形貌,当煤矸石发生自燃后煤矸石中高岭石的层状稳定结构发生破坏,形貌上出现更多细小的片状颗粒晶体(如图3)。

表1 不同地区煤矸石化学成分

Table 1 Chemical composition of coal gangue in different regions

序号	来源	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Ti <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	烧失量
1	陕西 <sup>[11]</sup>	0.81	60.38	24.73	5.76	1.37	1.36	0.89	4.31	0.11	/
2	山西 <sup>[12]</sup>	2.52	49.41	21.32	6.02	1.56	0.94	1.44	2.85	0.65	12.75
3	山东 <sup>[13]</sup>	1.12	58.77	22.56	4.89	1.53	0.88	1.33	0.19	1.08	11.52
4	内蒙古 <sup>[14]</sup>	0.14	38.37	33.00	0.80	0.03	0.16	0.09	0.11	/	24.93
5	贵州 <sup>[15]</sup>	0.30	43.67	33.16	8.77	0.20	1.62	0.62	0.44	/	6.70
6	江苏 <sup>[16]</sup>	3.38	55.50	18.15	5.42	1.23	/	0.64	1.67	0.64	13.32
7	江西 <sup>[17]</sup>	1.24	52.56	16.57	3.35	2.01	/	0.21	2.39	/	20.71
8	重庆 <sup>[18]</sup>	3.57	66.71	21.10	6.27	6.24	/	0.48	2.57	2.37	3.51
9	新疆 <sup>[19]</sup>	14.22	9.71	2.47	2.24	18.27	/	/	/	/	55.44



(a) 原煤矸石

(b) 自燃煤矸石

图3 原煤矸石与自燃煤矸石微观形貌

Fig. 3 Micromorphologies of raw gangue and spontaneous combustion gangue

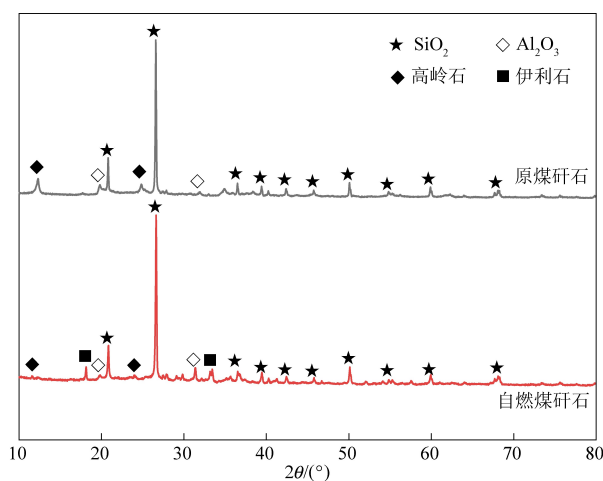


图4 煤矸石矿物组成

Fig. 4 Mineral composition of gangue

## 2 煤矸石在建材领域的研究进展

建材工业是国民经济非常重要的基础性产业,也是能源与资源消耗的重要行业之一,据相关统计,我国建筑行业消耗的能源和建材资源占社会总能耗的50%<sup>[22]</sup>。建筑材料作为使用巨量自然资源的最大人造材料,是建筑中的主要资源占比和能源消耗,因此对建材的绿色化处理有助于实现建筑的可持续发展。利用固废制备绿色建材是固废实现大规模利用的重要途径,符合环保业和绿色建筑业的发展需求,也是生态文明和社会绿色、循环、低碳发展的必然要求。煤矸石生产建材产品是煤矸石综合利用的主要途径之一。目前在建材领域煤矸石主要用于水泥原料、辅助胶凝材料、混凝土骨料、烧结砖、免烧砖、陶粒轻骨料等<sup>[23]</sup>。近年来,在相关政策的推动与引导下,煤矸石在建材领域的综合利用技术得到一定发展,利用量保持了相对稳定增长,但鉴于煤矸石巨大的产生量和堆存量,煤矸石的综合利用率尤其是

在规模化高价值产品的利用方面仍然不足。

### 2.1 生产水泥

水泥行业受固有原料结构和生产工艺限制,成为二氧化碳的排放大户。2020年,水泥工业的碳排放占全球人为CO<sub>2</sub>排放总量的7.5%,而在我国其占比却高达13.75%。在碳中和背景下,加快煤矸石等固废资源在水泥生产中的绿色化应用对降低水泥行业碳排放有重要意义。

#### 2.1.1 生产硅酸盐水泥

煤矸石属于硅铝铁基固体废物,富含SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,成分类似黏土,可以作为一种硅铝质原材料用于硅酸盐水泥熟料的生产。孙道胜等<sup>[24]</sup>利用煤矸石作为硅铝质原料,搭配石灰石、铁尾矿及石英砂,控制石灰石饱和系数 $KH=0.95$ 、铝率 $IM=1.55$ 、硅率 $SM=2.55$ 的理论率值下,在温度1400~1450℃下,熟料的易烧性较好,制备的水泥净浆3d抗压强度为45.3 MPa,28d抗压强度达到了95.3 MPa。方仁玉等利用石灰石废石和煤矸石在年产30万t的干法水泥生产线上成功实现了一种优质的道路硅酸盐水泥的生产,设计并优化后的三个率值分别为 $KH=0.92$ , $n=2.1$ , $p=0.7$ ,制备的水泥3d砂浆抗压强度26.5 MPa,28天抗压强度49.9 MPa,产品已经应用在多项重点工程建设中,取得了一定社会效益和经济效益。孔德高等<sup>[25]</sup>利用煤矸石与矿山剥离粘土生产的低碱水泥碱含量稳定在0.5%左右,熟料3d抗压强度27 MPa,28d抗压强度为57 MPa。由于煤矸石粉磨过程的助磨作用,电耗指标得到改善,生料电耗为11 kW·h/t。此外,煤矸石还可以用作辅助胶凝材料部分替代水泥以降低生产成本,事实上,限制煤矸石用于水泥混合材的主要问题是其较差的胶结性能,因其化学结构比较稳定,往往需要进行活化处理,机械活化、热活化、微波活化和复合活化

是煤矸石活化处理的主要方式。罗凯等<sup>[26]</sup>研究发现,煤矸石的最佳热活化温度为 750 ℃,活化后煤矸石的 7 d 活性为 103%,28 d 活性为 107%,而且,利用活化后的煤矸石与石灰石协同掺入代替部分水泥熟料将促进水泥颗粒的水化,由此制备的活化煤矸石-石灰石复合水泥的 7 d 和 28 d 的胶砂抗压强度分别达到了 38.4 MPa 和 60.3 MPa,达到了纯水泥强度的 104%。煤矸石在自燃过程中由于其内部的黏土矿物遭到破坏,形成了更多无定型的活性组分  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,因此自燃煤矸石具有一定的活性可直接用于水泥的生产。张富春等<sup>[27]</sup>研究了自燃煤矸石不同细度和掺量对水泥性能的影响,发现自燃随着自燃煤矸石掺量和细度的增加,水泥的需水量增大,流动度下降,凝结时间延长,抗压强度随着掺量增加而降低,随着细度的增大而增大,而且前期强度不明显,后期增长显著,显示出自燃煤矸石具备在水化中后期的二次水化能力。

### 2.1.2 生产普通硫铝酸盐水泥

硫铝酸盐水泥(SAC)作为一种更低碳的资源节约型第三系列胶凝材料被认为是普通硅酸盐水泥有力的替代品,硫铝酸盐水泥以无水硫铝酸钙( $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ )、硅酸二钙( $\text{C}_2\text{S}$ )、铁相为主要矿物,具有早强、快硬、抗渗、防腐、耐侵蚀等特点。硫铝酸盐水泥煅烧温度区间在 1 200~1 350 ℃ 左右,相比硅酸盐水泥熟料的煅烧温度(1 400~1 450 ℃)低 100~150 ℃,而且其成分上的低钙属性,使其生产过程中二氧化碳的排放量较低。然而,硫铝酸盐水泥熟料的生产需要价格昂贵的高品位铝矾土,使其生产成本居高不下,利用适宜的固废原料制备硫铝酸盐水泥使节约自然资源降低生产成本的有效途径。郭伟等<sup>[28]</sup>以煤矸石、脱硫石膏、石灰为主要原料,采用水热合成-低温煅烧方法制备了硫铝酸钙-贝利特水泥熟料,混合料先在 120 ℃ 下水热合成前驱体后在煅烧,1 050 ℃ 下即可制备出硫铝酸钙-贝利特水泥熟料,与一步煅烧法相比,水热合成-低温煅烧水泥的早期水化放热速率加快,但总的水化放热量相同。水泥掺入 13% 的二水石膏后 1 d 和 28 d 抗压强度分别达到了 30.2 MPa 和 57.3 MPa。水化产物主要为长纤维状的 AFt 及少量的 C—S—H 凝结,钙矾石晶体生长完整且相互交织形成网络结构,是前期强度的主要来源。为了进一步提高硫铝酸盐水泥生产过程固废资源的利用率,加强固废之间的协同作用,Ren

等<sup>[29]</sup>利用煤矸石、脱硫石膏、废铝渣、电石渣 4 种工业固废在 1 150~1 300 ℃ 范围内制备了高性能的硫铝酸盐胶凝材料,煤矸石的利用率在 8%~15%,制备的水泥 3 d 抗压强度达到 59.5 MPa,28 d 抗压强度达到 75 MPa。Yao 等<sup>[30]</sup>利用煤矸石协同石灰石尾矿、脱硫石膏和铝灰同样制备了矿物成分与普通硫铝酸盐水泥熟料类似的 SHCM 熟料,SHCM 砂浆表现优异力学强度,3 d 和 28 d 抗压强度分别达到 45.7 MPa 和 67.8 MPa。与普通 SAC 后期强度增长缓慢不同的是,后期强度增进率高且持续增加。尽管煤矸石在普通硫铝酸盐水泥的生产以及得到利用,但由于成分限制,煤矸石的掺入量往往不超过 15%,利用率仍然有限。

### 2.1.3 生产高贝利特硫铝酸盐水泥

高贝利特硫铝酸盐水泥(HBSAC)是在普通硫铝酸盐水泥基础上发展出来的通过提高  $\text{C}_2\text{S}$  含量,降低  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  含量并以  $\text{C}_2\text{S}$  为主导矿物的一种低碳水泥,它兼具贝利特水泥后期强度增长稳定和普通硫铝酸盐水泥早强的特点<sup>[31]</sup>,由于 HBSAC 相比普通硫铝酸盐水泥高硅低铝的特点,可以节约铝矾土资源并对高硅质原料具备更高掺量的接受度,因此采用煤矸石为原料制备 HNSAC 可进一步提高煤矸石的利用率。张海文等<sup>[32]</sup>验证了利用废渣煤矸石、磷石膏和石灰石制备 HBSAC 的可行性,煅烧温度期间在 1 300~1 440 ℃ 内可制备出的矿物组成区间分别为  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  50%~65%、 $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  25%~40% 和  $\text{C}_4\text{AF}$  5%~7%,根据正常凝结时间下强度最高原则,煤矸石的最佳利用率为 28%,水泥净浆初凝时间为 33 min,终凝时间为 139 min,试样的 1、3、7、28 d 胶砂抗压强度分别为 33.7、43.9、49.5、70.1 MPa。徐冠立等<sup>[33]</sup>采用宁夏石嘴山煤矸石在 1 300 ℃ 制备了系列硫铝酸盐水泥包括 HBSAC,当 HBSAC 熟料的主要矿物组成设计为 59%  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 、29%  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  和 6%  $\text{C}_4\text{AF}$  时,煤矸石的利用率达到 32%。虽然利用煤矸石制备高贝利特硫铝酸盐水泥可以提高煤矸石的利用率,但是随着熟料矿物中的  $\text{C}_2\text{S}$  组分升高和  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  矿物的降低,HBSAC 的整体水化变得缓慢,慢慢失去了硫铝酸钙水泥早强快硬的优势,难以满足实际工程需求,一定程度限制了 HBSAC 的发展。

## 2.2 用作混凝土骨料

混凝土作为消耗最大的建筑材料,全球每年对混凝土的需求接近 75 亿  $\text{m}^3$ ,其中包含 130 亿 t 骨料<sup>[34]</sup>。近几十年来,随着基础建设发展对自然

资源的过度开发和广泛利用,砂石等天然骨料日益枯竭,导致天然骨料市场价格逐年上涨,甚至有些城市已经到了无砂可买的地步。因此,为了降低天然骨料的消耗和生产成本,寻找各种类型的合适的固体废弃物来替代天然骨料制备混凝土逐渐成为研究热点。煤矸石因其岩相特点,质地坚硬,经过破碎、筛分加工处理后可用作混凝土骨料。利用煤矸石取代不可再生的天然骨料生产混凝土,是解决天然骨料供应不足以及提高煤矸石的利用率有效途径,具有一定的经济效益和生态效益<sup>[35]</sup>。

原状煤矸石用作骨料时通常需要热处理,目的是为了去除煤矸石中的碳和有机质以减少骨料中的薄弱组分,同时热处理过程会改变煤矸石表面的矿相并形成更多的活性组分,使骨料与水泥基体的界面结合情况更理想。因此,很多学者直接采用自燃煤矸石做混凝土骨料。李少伟等<sup>[36]</sup>研究了自燃煤矸石作为粗骨料在不同取代率下的混凝土各项性能,研究结果表明:随着自燃煤矸石粗骨料取代率提升,混凝土拌和物的坍落度、表观密度、弹性模量均呈现降低趋势,塑性有一定程度改善,轴压纵向劈裂破坏形态越发明显;取代率小于50%的自燃煤矸石粗骨料对混凝土的内养护作用比其自身强度低的影响更为显著,使混凝土界面过渡区更为密实,抗压强度有一定幅度的提高;当取代率大于50%后,因自燃煤矸石粗骨料自身缺陷增多而导致混凝土强度有所下降。Yang等<sup>[37]</sup>发现未煅烧的原状煤矸石与水泥基体的界面结合较弱,界面过渡区存在明显裂纹,而煅烧后的原状煤矸石可以提高煤矸石混凝土的抗压强度,微观结构显示煅烧煤矸石骨料与水泥基体的界面结合更紧密,28 d 抗压强度较未煅烧煤矸石骨料提升了39%。此外,煤矸石强度低,且自身多孔、吸水率大的特点对煤矸石的耐久性产生一定影响。李永靖等<sup>[38]</sup>通过抗冻融循环试验,发现煤矸石骨料混凝土的抗冻性较普通碎石混凝土差,主要归因于煤矸石骨料的多孔结构和较大的吸水率,吸附在孔隙中的水在产生的湿胀和冻胀应力是混凝土强度丧失的主要来源。由此可见,由于煤矸石多孔结构、吸水率大,强度低等因素使得其作为骨料制备的混凝土工作性、强度和耐久性不佳。对煤矸石进行适当的改性以改善其自身的骨料特性,对提高煤矸石混凝土的性能有重要意义。笔者采用低成本的固废基硫铝酸盐水泥为胶结

剂,通过一种成球设备对煤矸石骨料进行动态裹浆处理,基于胶结剂的早强快硬特性,使煤矸石骨料表面形成一层低水灰比的致密壳层结构,改性后的煤矸石骨料的吸水率大幅降低,随后作为骨料制备的透水混凝土的拌和物需水量降低,抗压强度提升了4.8%,达到C25等级,透水系数 $>5\text{ mm/s}$ ,满足行业标准CJJ/T 135—2009要求,而且抗冻性测试显示,自燃煤矸石骨料混凝土较原状煤矸石骨料更具抗冻融循环能力<sup>[39]</sup>。骨料与基体之间的界面微观结构揭示了改性煤矸石骨料混凝土的强度提升机制一方面是由于动态裹浆改性形成的低水胶比的硬化“壳层”结构,组织了外部水分的进入骨料,从而降低了混凝土拌和需水量。另一方面,这是由于煤矸石表面的多孔结构和水泥基体的水化产物AFt在微孔中的自延伸生长起到了骨料与基体之间的强化连接作用,使ITZ的结构更加致密<sup>[40]</sup>。

煤矸石做骨料是一种既经济又环保的煤矸石规模化利用策略,可以一定程度弥补天然资源的不足。然而煤矸石强度低、吸水率大的特点也使其难以配置高强度等级的混凝土,导致煤矸石在混凝土行业的利用率仍然有限,而且不同地区煤矸石的性能存在差异,需要针对性的深入研究以控制骨料的性能满足混凝土指标要求,此外应关注煤矸石的低成本的预处理技术及煤矸石骨料与水泥基体的界面结合问题的改善。未来,探索低能耗、低成本的预处理方式和提高混凝土产品性能与附加值是煤矸石骨料大宗利用的研究重点。

### 2.3 制备墙体材料

制砖是煤矸石在墙体材料领域综合利用的主要途径,目前,煤矸石砖的年产量超过200亿块,年消耗煤矸石量达5000万t。煤矸石因主要矿物为黏土矿物,可以完全替代黏土资源生产烧结砖,而且由于自身含有一定热值,在制备烧结砖时可以节约外部能源消耗。目前有很多学者通过引入其他工业废弃物来改善煤矸石砖的性能。金彪等<sup>[41]</sup>以煤矸石、页岩和污泥为原料制备烧结砖,研究不同配比和烧结温度对烧结砖强度和物相组成的影响。结果显示在10%污泥、40%煤矸石和50%页岩的原料配比下,经1050℃焙烧6h,可制备出强度达到MU15等级的烧结砖,固废利用率最高可达70%。李珠等<sup>[42]</sup>以煤矸石、黏土为主要原料,以膨胀珍珠岩为造孔剂,在煤矸石与黏土的质量比为7:3,烧结温度为1050℃,膨胀珍珠岩

掺量为 80%,保温时间为 30 min 时,所制得的烧结透水砖性能最优,其劈裂抗拉强度为 3.75 MPa,透水系数为  $0.355 \times 10^{-2}$  cm/s。吴红等<sup>[43]</sup>以 66% 的活化煤矸石辅以 10% 水泥、8% 矿渣、14% 砂及 2% 外加剂 21%,养护温度 100 ℃,养护时间 12 h 的最佳工艺条件下制备了活化煤矸石基免烧砖,经检测强度、抗冻性、吸水率指标均完全满足 JC/T 422—2007《非烧结垃圾尾矿砖》MU15 标准要求。池鹏等<sup>[44]</sup>将煤矸石、粉煤灰、砂、外加剂等按一定比例混合,在成型压力 20 MPa,常温养护 28 d 下获得的煤矸石免烧砖最大抗压强度和抗折强度分别为 52.70 MPa 和 4.93 MPa,并指出在坯体成型时采用较大的成型压力可以提高致密度及最终样品的抗压强度,在实际使用过程中提高成型压力可作为改善免烧砖的物理性能的手段之一。此外煤矸石还可以制备保温砌块、多孔陶瓷等新型墙体材料。冯荣等<sup>[45]</sup>针对煤矸石通过超微细化、发泡控制、温度场调控、多层烧成的技术手段,并开发了具备优异保温性能(导热系数  $\leq 0.10$  W/(m·℃))和力学性能(抗压强度  $\geq 4.2$  MPa)的新型绿色自保温墙体材料,其中煤矸石利用率超过 70%。张会等<sup>[46]</sup>以煤矸石和滑石为主要原料,辅以适量的氧化铝,采用干压成型法(成型压力 80 MPa)在 1 225~1 350 ℃ 温度区间内成功制备出具有一定基础性能且物相为较纯净堇青石相的堇青石多孔陶瓷。利用煤矸石合成的高性能墙体材料为煤矸石的高值化利用提供了新途径,但受高成本、工艺复杂、技术不成熟等因素的限制,难以在普通市场上保持竞争力,消耗量有限。

### 3 煤矸石应用的环境影响

#### 3.1 重金属的浸出污染

煤矸石的大量露天堆放,不仅大量占用和破坏土地资源,煤矸石作为有害元素的载体在堆放回收过程中,由于自然风化和淋滤作用,所含重金属元素、有机物等有害物质存在浸出风险,重金属等有害元素随雨水径流渗入土壤和地下水,造成土壤和水体环境的严重破坏。当被污染的地下水用来灌溉农田时,重金属等元素会在植物体内富集,最终通过食物链危害人类的健康。Li 等<sup>[47]</sup>通过室内动态浸出实验,模拟了不同环境条件下低硫煤矸石中重金属的浸出和析出特征,为矿区环境恢复提供理论依据。研究结果表明:低硫煤矸

石中重金属含量越高,重金属浸出率越高;酸性条件促进低硫煤矸石中重金属的释放,降水越多,重金属从低硫煤矸石中释放越好。马骅等<sup>[48]</sup>采用地积累指数法和生态危害指数法对贵州省六盘水市煤炭矿区 3 座矸石山周边土壤中 Cr、Cd、Zn、Cu、Ni、Pb 共 6 种重金属元素的测定,分析结果显示:土壤重金属含量在平面上与煤矸石山距离总体成负相关趋势,最大污染点位置与煤矸石周边环境条件相关;煤矸石周边土壤中 Cd、Pb、Zn 污染程度最严重,其中 Cd 潜在生态风险系数最大,污染主要集中于土壤表土层,对深层土壤环境影响不大;Cu、Ni、Zn 总体污染程度不高,对土壤环境影响较轻。尚誉等<sup>[49]</sup>研究发现暴露于距矸石山不同距离的土壤种植的大麦幼苗生长受抑,部分土壤诱导叶绿素含量降低和丙二醛(MDA)含量升高,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和谷胱甘肽(GSH)活性上升,过氧化氢酶(CAT)活性显著下降,并且造成根尖细胞中有丝分裂指数(MI)降低和微核率(MN)显著上升。皮尔森相关系数表明,矸石堆积区周边土壤中 Cr、As 和 Zn 元素分别与大麦芽重、根重和微核率之间呈显著的正相关,Cu 和 Pb 元素分别与叶绿素和微核率之间呈显著的负相关。

#### 3.2 粉尘及有害气体污染

当前国内大多数矿区在生态安全规划方面不够健全,缺乏对煤矸石处理的合理的规划依据及对应的技术要求。煤矸石的一般以露天存放处理,长时间的露天存放使得煤矸石逐渐风化,在风力作用下会产生大量的粉尘颗粒及烟尘杂质。此外,煤矸石在提升运输、堆放过程中也会产生粉尘污染,这些自身密度较大的粉尘颗粒因进入大气后,主要漂浮于空气中,严重降低空气质量,并伴随呼吸作用危害人类及动植物健康。经调查发现,矿区周边居民出现气管病、气喘病等病例的比例逐渐上升,已经演变成为一项严重的社会问题<sup>[50]</sup>。另一方面,煤矸石对大气的污染表现为气体污染,在我国累积的矸石山在 1 500~1 700 多座,大约 1/3 的矸石山已经完成自燃或正在经历自燃过程。大量研究表明,当矸石的硫含量超过临界值,在外部环境温度较高、通风条件良好的状态下,煤矸石山内部极易蓄热并引发可燃组分发生自燃,产生明火,伴随其燃烧或自燃过程会产生大量的 CO、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、NO 等有害气体及烟尘,能够引起 CO 中毒等危害,尤其是煤矸石自燃

产生的  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$  能结合空气中的其他成分,形成酸雨,危害动植物安全及水土安全。

#### 4 煤矸石在建材领域的创新利用策略

总体来看,传统煤矸石在建材领域的资源化利用存在产品单一、性能不佳、附加值低等问题,煤矸石利用率高的产品普遍附加值不高,而高附加值产品往往利用率有限且存在二次污染等问题,常规的铺路、回填、制砖、制砌块等路径技术含量低、行业门槛低、产品档次低,造成煤矸石利用的大规模与高附加值难以兼顾,无法真正实现煤矸石资源化过程的节能减排和绿色循环发展,这也暴露了目前固废资源化与产业发展的“卡脖子”问题,即产品性能与成本的矛盾。产品性价比是决定市场竞争力的根本,由于固废通常成分复杂多变、预处理要求高、制约因素多,常规利用所制备的产品与用天然原料相比,恰恰成本不低而性能不高,最终导致产品缺乏市场竞争力,行业难以维持。解决不了该矛盾,很难真正变废为宝,很难使固废真正得到资源化利用和有效处置。固废资源循环利用长期以来缺少根本性的技术创新,已不能适应当前经济社会发展的需要,亟待突破。

笔者团队以工程应用为目标,深入分析了制

约煤矸石等大宗固废资源化利用的关键瓶颈,提出了固废协同互补、两级跃迁、提质增值利用的创新理念。并以此为基础形成了煤矸石与多元固废协同互补、多级迭代利用的技术与产业体系(如图5),该技术体系强调多元固废协同,根据不同固废在物质属性上物理、化学及矿相上的互补性,实现固废利用化过程中的价值最大化挖掘并获得高值化终端材料产品,通过煤矸石与其他硅铝铁基固废(钢渣、赤泥、尾矿等)和硫酸钙基固废(脱硫石膏、磷石膏、钛石膏等)协同互补,达到高价值的硫铝铁系低碳胶凝材料的原料要求;然后经过低温煅烧,获得低成本、高性能的硫铝铁系低碳胶凝材料产品,实现固废价值的一级跃迁;再发挥该材料的早强、高强、快硬特性,作为基材进一步协同煤矸石骨料、自燃煤矸石粉等制备静压成型免烧路面砖、免蒸养预制构件、矸石基复合矿粉、基于改性煤矸石骨料的生态混凝土等系列高端绿色建材产品,完成两级跃迁,最后注重制品的环境影响及经济性评价。因此,发展煤矸石的多元协同、迭代利用和环境-材料一体化资源化利用是技术创新的方向。更重要的是,基于上述创新理念,有望在特定区域构建煤矸石等固废制备绿色建材的循环经济产业链,实现固废规模化协同消纳,助力地方经济发展和社会需求。

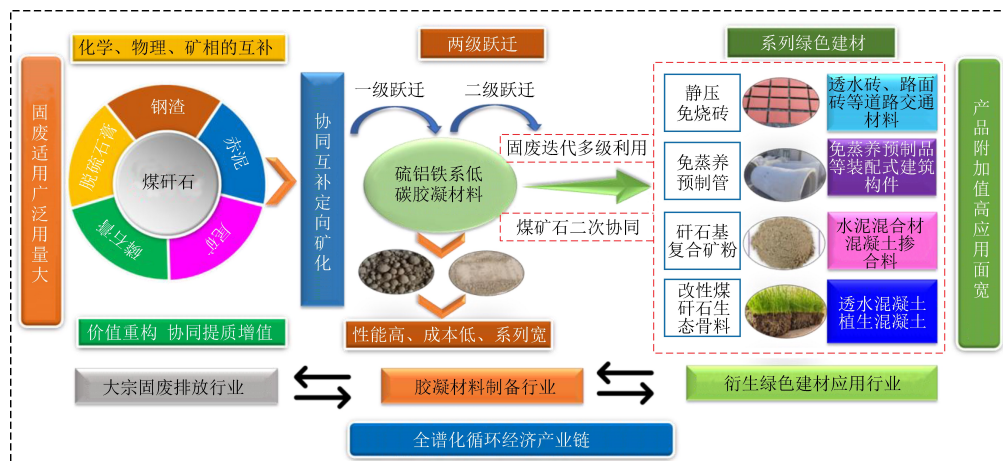


图5 煤矸石与多固废协同互补制备高值绿色建材创新理念

Fig. 5 Innovative concept of synergistic and complementary production of high value green building materials by coal gangue and multi-solid wastes

#### 5 建议与展望

我国煤矸石综合利用方面虽然已经取得长足进步,但其规模化利用技术仍未成熟,煤矸石应用于建材领域是富有前景的重要途径,能够实现煤矸石规模化消纳和高值化利用,应优先发展,在建

材领域煤矸石可以制备陶瓷材料、制砖、水泥、混凝土等,具有成本低廉、能耗低的优势。在双碳背景和绿色建筑工业化的行业发展方向下,随着国家相关政策的支持,煤矸石在建材领域的发展将具有广阔的发展空间。为顺应时代和国家发展理念,煤矸石在建材领域综合利用应注重以下问题:

(1) 差异化利用煤矸石。不同用途对煤矸石理化性质和矿物成分的要求不同,对环境的影响也不同。因此,在选择合理利用煤矸石时,应对煤矸石进行分类,根据煤矸石理化特性和矿相不同进行差异化利用,发挥不同物性煤矸石的优势以提高综合利用率。例如,含有高热值的煤矸石可用于发电;低热值煤矸石可用于制砖和水泥;自燃后的煤矸石可以做水泥混合材或混凝土掺合料;硫含量超标的煤矸石不能用于制砖。因此,政府有必要根据国家产业政策和煤矸石综合利用的技术要点,制定煤矸石综合利用规划。

(2) 建立科学排放标准。煤矸石作为潜在有害元素的载体,煤矸石制品对环境的污染应引起特别关注。煤矸石制品的重金属检测和煤矸石电厂污染物的排放均应低于相关标准。然而,目前对各种煤矸石利用的排放标准并不全面,只考虑了少数几种有毒元素。因此,政府有必要制定具体的煤矸石使用标准和有害物质排放标准。

(3) 制定鼓励煤矸石利用和技术创新的政策。鼓励选煤厂技术创新,提高煤炭资源利用率,减少煤矸石的产生量。目前煤矸石利用率较低,特别是在煤炭资源丰富的地区,政府应制定激励政策,出台系列关于煤矸石等工业废弃物综合利用的政策、法规并加强落实,促进煤矸石回收利用。煤矸石利用的技术创新,不仅可以减少煤矸石的堆积,还可以减轻环境污染。

(4) 加强固废协同,提高产品绿色度。煤矸石作为单一固废其价值挖掘往往受限,制备的产品单一且附加值不高,难以打破固废制品成本与性能的壁垒,加强煤矸石与其他多固废之间的协同可以充分发挥各固废之间在物理、化学和矿物特性上的互补性,实现价值上协同提质增值。此外,在产业层面应鼓励产学研相结合,促进相关产业链的多产业协同创新与应用推广,建立示范工程,扩大产业化规模,攻关针对性和结合实际的生产工艺方法和技术,降低煤矸石的综合利用成本,同时,加强环保意识,注重制品的环境影响,避免二次污染对环境的危害。

(5) 建立健全跟踪管理体系。煤矸石综合利用项目开工前应进行可行性评估,对效益差或环境影响大的项目应予以终止。在项目实施过程中,根据施工要求,建立科学的管理制度,监控是否符合项目计划,项目实施情况如何,进行合理管理,提出科学建议。

## 6 结 语

我国以煤炭为主的能源结构决定了煤矸石资源化利用的规模程度和技术深度。随着科学技术的发展以及对煤矸石资源化综合利用认识的不断深入经过广大科技工作者的努力,煤矸石的利用率不断提高,资源化利用的道路也越来越宽,特别是在建材领域取得了长足的进步,有效推动了煤矸石的资源化和无害化。我国煤矸石的综合利用虽然已经取得了一定的进展,但实际规模化资源利用率不高,由于各地煤矸石的差异,应当因地制宜,开发出针对性和结合实际的应用技术,坚持差异化利用,高附加值利用和绿色协同利用,将煤矸石这个放错位置的资源真正变废为宝,最终实现经济效益、社会效益和环境效益有机统一。

### 参考文献(References):

- [1] 常纪文, 杜根杰, 杜建磊, 等. 我国煤矸石综合利用的现状, 问题与建议[J]. 中国环保产业, 2022(8): 13-17.  
CHANG Jiwen, DU Genjie, DU Jianlei, et al. Current situation of the comprehensive utilization of coal gangue in China and the related problems and recommendations [J]. China Environmental Protection Industry, 2022(8): 13-17.
- [2] 张宏, 郑旭鹤. 双碳愿景下煤炭行业低碳可持续发展模式研究[J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(9): 66-73.  
ZHANG Hong, ZHENG Xuhe. Research on low-carbon sustainable development mode of coal industry under the dual carbon vision [J]. Coal Economic Research, 2022, 42(9): 66-73.
- [3] Li Y. Review of coal gangue characteristics and ecological restoration management technology[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 781(3): 032033.
- [4] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165-178.  
LI Zhen, XUE Jia, ZHU Zhanglei, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 165-178.
- [5] Zhang Y, Ling T C. Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials - A review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117424.
- [6] Cao J. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 146: 23-28.
- [7] 中国煤炭工业协会. 2020 煤炭行业发展年度报告[R/OL]. (2021-03-30) [2022-06-25]. <http://www.coalchina.org.cn/uploadfile/2021/0303/20210303022435291>.
- [8] 杨方亮, 许红娜. “十四五”煤炭行业生态环境保护与资源综合利用发展路径分析[J]. 中国煤炭, 2021, 47(5): 73-82.  
YANG Fangliang, XU Hongna. Analysis on the development path of ecological environment protection and resources com-

- hensive utilization in coal industry during the 14th Five-Year Plan period [J]. *China Coal*, 2021, 47(5): 73–82.
- [9] 王玉涛. 煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用现状与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10): 54–66.
- WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 54–66.
- [10] 王国平, 孙传敏. 浅论煤矸石资源化及其分类[J]. *煤炭经济研究*, 2004, 4(5): 19–20.
- WANG Guoping, SUN Chuanmin. A brief discussion on the resource utilization and classification of coal gangue [J]. *Coal Economic Research*, 2004, 4(5): 19–20.
- [11] Wu H, Wen Q, Hu L, et al. Feasibility study on the application of coal gangue as landfill liner material [J]. *Waste Management*, 2017, 63: 161–171.
- [12] Na Z, Liu X, Sun H, et al. Pozzolanic behaviour of compound-activated red mud-coal gangue mixture [J]. *Cement & Concrete Research*, 2011, 41(3): 270–278.
- [13] 贾敏. 煤矸石综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 46–52.
- JIA Min. The current situation research on comprehensive utilization of coal gangue [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(4): 46–52.
- [14] 张吉雄. 矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 24–25.
- ZHANG Jixiong. Study on strata movement controlling by raw waste backfilling with fully-mechanized coal winning technology and its engineering applications [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008: 24–25.
- [15] 杨旭, 周家喜. 贵州遵义地区煤矸石元素地球化学特征及其综合利用信息[J]. *矿物学报*, 2013, 33(2): 189–193.
- YANG Xu, ZHOU Jiayi. Element geochemistry and comprehensive utilization of coal gangue, Zunyi city, Guizhou Province, China [J]. 2013, 33(2): 189–193.
- [16] Li D, Song X, Gong C, et al. Research on cementitious behavior and mechanism of pozzolanic cement with coal gangue [J]. *Cement & Concrete Research*, 2006, 36(9): 1752–1759.
- [17] Gu B W, Wang P M. Analysis of factors affecting pozzolanic activity in thermal activated coal gangue [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(1): 6–11.
- [18] Yi C, Ma H, Zhu H, et al. Study on chloride binding capability of coal gangue based cementitious materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 649–656.
- [19] 黄艳利, 王文峰, 卞正富. 新疆煤基固体废物处置与资源化利用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 319–330.
- HUANG Yanli, WANG Wenfeng, BIAN Zhengfu. Prospects of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 319–330.
- [20] 宋天奇. 煤矸石充填材料地球化学特征及重金属元素迁移行为研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019: 3–11.
- SONG Tianqi. Study on geochemical characteristics and heavy metal element migration of coal gangue backfilling material [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019: 3–11.
- [21] 刘文昌, 潘永泰, 赵英霄, 等. 阳泉地区煤矸石堆存现状及治理建议[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2018(11): 67–70.
- LIU Wenchang, PAN Yongtai, ZHAO Yingxiao, et al. Current situation and treatment suggestion of coal gangue piling in Yangquan [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2018(11): 67–70.
- [22] 宋欢, 汪竞争. 煤矸石在建材领域的应用进展[J]. *当代化工研究*, 2021(22): 69–71.
- SONG Huan, WANG Jingzheng. Technical progress of secondary utilization of coal gangue in industry and agriculture [J]. *Modern Chemical Research*, 2021(22): 69–71.
- [23] 王超男, 胡新萍, 任涛, 等. 利用煤矸石及废陶瓷制备泡沫陶瓷的研究[J]. *江西建材*, 2020(8): 28–29.
- WANG Chaonan, HU Xiping, REN Tao, et al. The investigation on preparation of porous ceramic by using coal gangue as the raw materials [J]. *Jiangxi Building Materials*, 2020(8): 28–29.
- [24] 孙道胜, 苏文君, 王爱国, 等. 以煤矸石为硅铝质原料制备水泥熟料的试验研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(16): 130–134.
- SUN Daosheng, SU Wenjun, WANG Aiguo, et al. Experiment research on utilization of coal gangue as silicon-aluminum raw material in the preparation of cement clinker [J]. *Materials Reports*, 2016, 30(16): 130–134.
- [25] 孔德高, 徐梅花. 利用煤矸石和矿山剥离粘土生产低碱水泥的实践[J]. *水泥技术*, 2021(1): 81–83.
- KONG Degao, XU Meihua. Practice of producing low alkali cement with coal gangue and mine stripping clay [J]. *Cement Technology*, 2021(1): 81–83.
- [26] 罗凯, 李军, 曾计生, 等. 活化煤矸石-石灰石复合水泥的性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2022, 44(7): 10–15.
- LUO Kai, LI Jun, ZENG Jisheng, et al. Study on properties of activated coal gangue-limestone composite cement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2022, 44(7): 10–15.
- [27] 张富春, 毋娟, 邵喜东, 等. 自燃煤矸石作为水泥混合材的研究[J]. *混凝土世界*, 2017, 92(2): 88–91.
- ZHANG Fuchun, WU Juan, SHAO Xidong, et al. Study on spontaneous combustion coal gangue as cement mixture [J]. *China Concrete*, 2017, 92(2): 88–91.
- [28] 郭伟, 王春, 俞平胜, 等. 水热合成-低温煅烧硫铝酸钙水泥熟料矿物的形成过程[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(2): 206–211.
- GUO Wei, WANG Chun, YU Pingsheng, et al. Mineral formation mechanism of calcium sulfoaluminate cement clinker in hydrothermal-low temperature sintering process [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(2): 206–211.
- [29] Ren C, Wang W, Li G. Preparation of high-performance cementitious materials from industrial solid waste [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 39–47.
- [30] Yao Y, Wang W, Ge Z, et al. Hydration study and characteristic analysis of a sulfoaluminate high-performance cementitious

- material made with industrial solid wastes[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 112: 103687.
- [31] 苏敦磊, 王新波, 李秋义, 等. 固废制备高贝利特硫酸铝盐水泥的研究进展[J]. 建筑技术, 2021, 52(11): 81-84. SU Dunlei, WANG Xinbo, LI Qiuyi, et al. Research progress on preparation of high Belite sulfoaluminate cement with solid waste[J]. Architecture Technology, 2021, 52(11): 81-84.
- [32] 张海文, 兰明章, 陈智丰, 等. 利用工业废渣烧制高贝利特硫酸铝盐水泥的探索性研究[J]. 新世纪水泥导报, 2002(2): 25-29. ZHANG Haiwen, LAN Mingzhang, CHEN Zhifeng, et al. Exploratory study on firing High Belite sulfoaluminate cement with industrial waste slag[J]. Cement Guide for New Epoch, 2002(2): 25-29.
- [33] 徐冠立. 利用宁夏石嘴山煤矸石制备系列硫酸铝盐水泥研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009: 27-39. XU Guanli. Research of utilizing coal gangue in Shizuishan district to produce series of sulfoaluminate cements[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009: 27-39.
- [34] 王爱国, 朱愿愿, 徐海燕, 等. 混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2076-2086. WANG Aiguo, ZHU Yuanyuan, XU Haiyan, et al. Research progress on coal gangue aggregate for concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2076-2086.
- [35] 高扬. 煤矸石作混凝土粗集料发展现状[J]. 建材发展导向, 2022, 20(16): 4-6. GAO Yang. Development status of coal gangue as coarse aggregate for concrete[J]. Development Guide to Building Materials, 2022, 20(16): 4-6.
- [36] 李少伟, 周梅, 张莉敏. 自燃煤矸石粗骨料特性及其对混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 334-341. LI Shaowei, ZHOU Mei, ZHANG Limin. Properties of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 334-341.
- [37] Yang J, Su Y, He X, et al. Pore structure evaluation of cementing composites blended with coal by-products: Calcined coal gangue and coal fly ash[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 181: 75-90.
- [38] 李永靖, 韩俊俊, 邢洋, 等. 煤矸石骨料混凝土的冻融循环试验研究[J]. 混凝土, 2013(12): 100-102. LI Yongjing, HAN Junjun, XING Yang, et al. Research on the freezing and thawing cycle test of coal gangue aggregate concrete[J]. Concrete, 2013(12): 100-102.
- [39] Changliang Wu, Chao Zhang, Jingwei Li, et al. A sustainable low-carbon pervious concrete using modified coal gangue aggregates based on ITZ enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134310.
- [40] Li Y, Liu S, Guan X. Multitechnique investigation of concrete with coal gangue[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124114.
- [41] 金彪, 赵亮, 汪潇, 等. 利用煤矸石、页岩、污泥制备烧结砖的研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(5): 39-41. JIN Biao, ZHAO Liang, WANG Xiao, et al. Preparation of sintered brick with sludge, shale and gangue[J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(5): 39-41.
- [42] 李珠, 刘家乐, 刘鹏, 等. 煤矸石烧结透水砖的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(4): 21-23. LI Zhu, LIU Jiale, LIU Peng, et al. Experimental study on sintered water permeable brick for coal gangue sintering[J]. New Building Materials, 2018, 45(4): 21-23.
- [43] 吴红, 卢香宇, 罗忠竟, 等. 活化煤矸石免烧砖制备及机理分析[J]. 非金属矿, 2018, 41(1): 30-33. WU Hong, LU Xiangyu, LUO Zhongjing, et al. Preparation and mechanism analysis of activated coal gangue unburned bricks[J]. Non-Metallic Mines, 2018, 41(1): 30-33.
- [44] 池朋, 吴小文, 赵海卿, 等. 煤矸石基免烧砖制备工艺及力学性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 95-99. CHI Peng, WU Xiaowen, ZHAO Haiqing, et al. Preparation and mechanical properties of non-burning bricks with coal gangue as main raw materials[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 95-99.
- [45] 冯荣, 王琨, 孟凡然, 等. 煤矸石制备多孔发泡陶瓷基多孔自保温砌块的研究[J]. 佛山陶瓷, 2020, 30(4): 15-18. FENG Rong, WANG Kun, MENG Fanran, et al. Study on preparation of porous foamed ceramic based multi-hole self-insulation block from coal gangue[J]. Foshan Ceramics, 2020, 30(4): 15-18.
- [46] 张会, 王星雨, 赵钰明, 等. 高掺量煤矸石制备堇青石多孔陶瓷的性能研究[J]. 当代化工, 2022, 51(10): 2344-2347. ZHANG Hui, WANG Xingyu, ZHAO Yuming, et al. Study on the properties of porous cordierite ceramics synthesized from coal gangue with high content[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(10): 2344-2347.
- [47] Li C, Zheng L, Jiang C, et al. Characteristics of leaching of heavy metals from low-sulfur coal gangue under different conditions[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8: 780-789.
- [48] 马骅, 任明强, 赵宾. 煤矸石毒性浸出及周边土壤环境影响分析[J]. 能源环境保护, 2017, 31(3): 55-58. MA Hua, REN Mingqiang, ZHAO Bin. Analysis of coal gangue leaching toxicity and influence on surrounding soil environment[J]. Energy Environmental Protection, 2017, 31(3): 55-58.
- [49] 尚誉, 桑楠. 煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3773-3780. SHANG Yu, SANG Nan. Pollution characteristics and phytotoxicity of heavy metals in the soil around coal gangue accumulation area[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3773-3780.
- [50] 张珂玮. 矸石对生态环境质量的影响分析及治理措施研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 8: 139-140. ZHANG Kewei. Analysis of influence of gangue on ecological environment quality and study of treatment measures[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 8: 139-140.