

中国玄武岩矿石和矿床类型、资源分布及工业开发利用现状

廖世龙^{1,2}, 王春连², 杨飞¹, 陈振红^{1,2}, 王文浩^{2,3}, 尹传凯², 游超^{2,4}, 刘开源^{2,5}

(1. 长江大学油气资源与勘查技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 5. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 玄武岩是自然界分布最广的喷出岩, 储量较大。满足工业标准具有经济开采价值的玄武岩矿石具有独特的天然属性和优异性能被广泛用于各个工业领域。我国玄武岩矿资源丰富、分布广泛, 但学界对该矿种的研究较少, 总结我国玄武岩矿资源分布特征、工业开发利用现状对我国玄武岩矿产业发展有着重要的意义。本文综合了国内外的研究文献, 梳理了中国玄武岩矿的分布特征, 总结了玄武岩矿石、矿床类型及工业开发利用现状。研究表明中国玄武岩总量约为2万亿立方米, 玄武岩矿石开采量截至2023年底已达到9150万吨, 并还在逐年增加。玄武岩矿床依据地球化学成分的差异可分为拉斑、钙碱性、碱性玄武岩矿床。产出矿石类型主要有建筑用、铸石用、岩棉用、饰面用、水泥混合材用5种类型, 其中以建筑用玄武岩矿石和碱性玄武岩矿床最为常见。在工业开发利用上, 玄武岩多用于建筑及建材领域, 除此之外也可作为核废物固化材料、固碳材料和农业肥料。随着国家经济的发展, 工业上对玄武岩矿石的开采与消耗量以年均7%的趋势升高, 市场规模年均复合增长率超过10%, 市场前景向好。在开发利用过程中, 国内玄武岩矿石在建筑及建材领域消费占比高达98.5%, 而在其他领域占比仅为1.5%, 预期未来玄武岩矿石及其深加工产品向更广阔的领域拓展应用已成为必然趋势。

关键词: 玄武岩矿; 分布特征; 矿床类型; 开发利用; 地质调查工程

中图分类号: P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)03-0710-17

Basalt ore and deposit types, resource distribution, industrial development and utilization status in China

LIAO Shi-long^{1,2}, WANG Chun-lian², YANG Fei¹, CHEN Zhen-hong^{1,2}, WANG Wen-hao^{2,3}, YIN Chuan-kai², YOU Chao^{2,4} and LIU Kai-yuan^{2,5}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 5. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Basalt is the most widely distributed extrusive rock in nature, with large reserves. Basalt ore, which meets industrial standards and has economic mining value, is widely used in various industrial fields because of its

收稿日期: 2024-08-29; 接受日期: 2025-04-09; 编辑: 尹淑萍

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费(KK2322, KK2005); 国家自然科学基金项目(U20A2092, 42002106); 中国地质调查局地质矿产调查项目(DD20230056)

作者简介: 廖世龙(2001-), 男, 硕士研究生, 战略性非金属矿床成矿规律研究方向, E-mail: 1322501267@qq.com; 通讯作者: 王春连(1983-), 男, 研究员, 主要从事沉积学及矿床学方面的研究, E-mail: wangchunlian312@163.com。

unique natural properties and excellent performance. Although China is rich in basalt mineral resources and widely distributed, there is less research on this deposit in the academic community. It is of great significance to summarize the distribution characteristics of basalt ore resources and the current situation of industrial development and utilization in China. This paper summarizes the domestic and foreign research, combs the distribution characteristics of basalt deposits in China, and summarizes the basalt ore, deposit types, industrial development and utilization status. The research shows that the total basalt volume in China is estimated to be about 2 trillion cubic meters, and the basalt ore mining volume has reached 91.5 million tons by the end of 2023, and is still increasing year by year. Basalt deposits can be divided into tholeiitic, calc alkaline and alkaline basalt deposits according to the difference of geochemical composition. From the perspective of ore types, there are mainly five types of basalt deposits for construction, cast stone, rock wool, veneer and cement mixture, among which basalt ore for construction and alkali basalt deposits are the most common. In terms of industrial development and utilization, basalt is mainly used in the field of construction and building materials. In addition, basalt can also be used as a solidification material for nuclear waste, carbon fixation material and agricultural fertilizer. With the development of the country, the mining and consumption of basalt ore in industry are increasing year by year with an average annual growth rate of 7%, and the compound annual growth rate of market scale is more than 10%. The market prospect is good. In the process of development and utilization, domestic basalt ore accounts for 98.5% of the consumption in the field of construction and building materials, while it only accounts for 1.5% in other fields. It is expected that in the future, basalt ore and its deep-processing products will expand their application in a broader field, which has become an inevitable trend.

Key words: basalt ore; distribution characteristics; deposit type; development and utilization; geological survey engineering

Fund support: Project of Basic Scientific Research Business Fees for Public Welfare Research Institutes at the Central Level (KK2322, KK2005); National Natural Science Foundation of China (U20A2092, 42002106); China Geological Survey Project (DD20230056)

玄武岩是由岩浆喷发到地表冷凝而成的致密状或泡沫状基性喷出岩,颜色呈黑色或灰绿色等暗色。主要矿物成分为辉石、长石、橄榄石等,是地球洋壳和陆壳的主要组成物质,也是分布最广泛的火山岩。在工业科技上,其具有高强度、耐磨、耐腐蚀等特性可作为建筑、基础设施、高新技术领域的关键材料;在农业上,其粉末肥料作为天然矿物肥料常用于改良土壤肥力,相比于传统肥料更加环保;在经济上,秉持降本增效的理念,由于其存在广泛且开发成本低,是可持续发展建设的理想选择。如今玄武岩已经成为人类赖以生存和发展的基础物质资源(霍泳霖等, 2022)。

玄武岩矿石为玄武岩体中满足工业标准具有经济开采价值的矿物资源的部分,常含铁、镁等金属元素,从玄武岩体中开采出来,经过加工和提炼后可以用于各种不同的用途。随着中国工程建设和制造业的不断升级,玄武岩矿石已逐步从普通石头和石料变成可供综合开发利用的资源(孟欣等, 2023)。

截止到2022年,国内玄武岩矿石当作建筑材料使用消耗占比近98.5%,剩下1.5%用于其他领域(如铸石、水泥混合、岩棉等)。作为一种新兴的矿物材料,随着工业技术的发展,目前我国玄武岩矿石及其深加工制品在其他领域应用越来越广,消耗量与需求量稳步上升。为了应对中国工业不断发展对玄武岩矿石逐年递增的需求,本文整理了国内外研究资料与文献,对国内外玄武岩矿资源分布特征与部分典型矿床进行了概述,总结了国内外工业开发利用现状,以期对玄武岩矿的勘探开发和应用提供帮助。

1 玄武岩矿石及矿床分类

国内玄武岩规模庞大、分布广泛,满足相关工业指标具有开采经济价值的玄武岩称为玄武岩矿。中国非金属矿产代号分类表中依据玄武岩用途的不同将符合工业开采需求的玄武岩矿石分为建筑用玄武

岩矿石、水泥混合材用玄武岩矿石、铸石用玄武岩矿石、岩棉用玄武岩矿石和饰面用玄武岩矿石 5 种,其中建筑用玄武岩矿石占国内玄武岩矿石总储量的 95% 以上。

1.1 玄武岩矿石分类

工业上常用的玄武岩矿石根据其构造不同大体可划分为 3 类:气孔状玄武岩矿石、杏仁状玄武岩矿石和致密状玄武岩矿石。气孔状玄武岩矿石结构上表现为气孔多、质地坚硬,常用于制造轻质混凝土以提高混凝土的绝热、隔声性能,其中极其发育的气孔状玄武岩矿石俗称“浮石”。此外,气孔状玄武岩矿石还可用于研磨金属、石料、工业催化剂、假山、盆景等景观装饰。杏仁状玄武岩矿石中的气孔被低温矿物充填,多用于建筑行业或铸石材料。致密状玄武岩矿石结构致密,常用于铺设路面,色泽优良者可作为高级建筑材料。质地细腻、光泽耀眼的玄武玻璃可作为玄武岩宝石售卖,受到一些珠宝设计师和消费者的欢迎,具有一定的市场潜力(孟欣等, 2023)。本文在玄武岩矿石构造分类上不做过多赘述,将按官方分类方法侧重介绍矿石在不同用途上的分类与区别。

1.1.1 建筑用玄武岩矿石

建筑用玄武岩矿石包含玄武岩卵石和玄武岩碎石,前者为玄武岩石在自然条件下经风化、破碎、堆积等过程形成粒径大于 4.75 mm 的岩石颗粒;后者则为天然玄武岩石、玄武岩卵石、玄武岩矿山废石经破碎、筛分等机械加工而成的粒径大于 4.75 mm 的岩石颗粒。玄武岩卵石可作为原料加工生产成机制砂配制高强混凝土(张坤等, 2020),多孔玄武岩碎石应用于高速公路路面基层,在湖北、湖南等地区有过相应的工程案例(魏宁等, 2023)。玄武岩矿石作为岩浆岩类建筑用矿石,在水饱和状态下,其母岩的岩石抗压强度应满足 ≥ 80 MPa。根据国家标准《建设用卵石、碎石》(GB/T14685-2022),将其分为 3 类,分别适用于不同强度等级的混凝土。Ⅰ类:宜用于强度等级大于 C60 的混凝土;Ⅱ类:宜用于强度等级 C30~C60 的抗冻抗渗及其他要求的混凝土;Ⅲ类:宜用于强度等级小于 C30 的混凝土,作为建筑用玄武岩矿开采应满足文件《建设用卵石、碎石》(GB/T14685-2022)相关指标(表 1)。

1.1.2 铸石用玄武岩矿石

玄武岩铸石制品分为玄武岩铸石管材和玄武岩铸石板材两种,工业上常用碧玄岩、碱性橄榄玄武岩作为原料。国内山东电力蓬莱铸石厂生产的刚王牌

表 1 建筑用玄武岩矿石国家标准 %

Table 1 National standards of basalt ore for construction

类别	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
泥块含量	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.7
硫酸盐含量	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.0
质量损失率	≤ 5	≤ 8	≤ 12
压碎指标	玄武岩卵石 ≤ 12	≤ 14	≤ 16
	玄武岩碎石 ≤ 10	≤ 20	≤ 30
空隙率	≤ 43	≤ 45	≤ 47
吸水率	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 2.5

玄武岩铸石复合管承担着国内外 100 余座火力发电厂中的除灰渣任务,每年节省下的钢材近万吨(辛亚, 1995)。玄武岩铸石板材在高炉冲渣沟中做内衬,比起钢板除具有耐腐蚀性强的优点,还能极大地延长板材使用寿命(刘玲, 2003)。玄武岩铸石管材一般呈管状,内部真空,常使用于管道系统;玄武岩铸石板材通常为平板状形状,常用于建筑结构支撑、墙壁、地板等。作为两种不同类型的材料,其余硅指数 $K[K = (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) - (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{FeO} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{Na}_2\text{O} + 4\text{K}_2\text{O})]$ (式中氧化物均以质量分数表示)有不同的标准,铸石板材用玄武岩的余硅指数 K 为 30~120,而铸石管材用玄武岩的余硅指数 K 为 50~150。铸石用玄武岩矿石目前工业上暂无正式的国家标准,本文通过收集到的文献整理出铸石用玄武岩矿石相关参考指标的适宜范围: Al_2O_3 含量(质量分数) 10%~20%、 MgO 4%~17%、 SiO_2 45%~51%、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} > 0.5$ 、 CaO 8%~11%、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 3%~5%。

1.1.3 岩棉用玄武岩矿石

玄武岩岩棉是玄武岩纤维的一种,常以橄榄拉斑玄武岩矿石为原料。玄武岩岩棉板内的玄武岩含量越高,其导热系数越小,保温效果就越好,因此作为建筑外墙外保温用材料,可以预防高层建筑外墙保温材料着火引起的火灾(乔慧敏, 2023)。玄武岩矿石的酸度系数 $M_a = [w(\text{SiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3)]/[w(\text{CaO}) + w(\text{MgO})]$ 决定了其对化学风化的敏感程度,黏度系数 $M_v = [m(\text{SiO}_2) + 2m(\text{Al}_2\text{O}_3)]/[m(\text{CaO}) + m(\text{MgO}) + m(\text{K}_2\text{O}) + m(\text{Na}_2\text{O}) + 2m(\text{Fe}_2\text{O}_3) + m(\text{FeO})]$ 决定了玄武岩拉长纤维的性能和质量(其中 w 和 m 分别代表各氧化物的质量分数和各氧化物的分子数)。国内矿棉生产中允许原料的化学成分可以有较大的波动,但对酸度系数与黏度系数有明确标准。岩棉用玄武岩矿石酸度系数应

保持在1.2~1.3之间,黏度系数应保持在1.2~2.0之间(张胜泽等,2018;霍泳霖等,2022),岩棉用玄武岩矿石相关参考指标的适宜范围为 Al_2O_3 含量(质量分数)11%~17%、 MgO 5%~11%、 SiO_2 44%~52%、 $^{\text{T}}\text{FeO}$ 4%~13%、 CaO 7%~13%、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 2%~4%。

1.1.4 饰面用玄武岩矿石

玄武岩矿作为装饰石材进行开采需满足以下条件:目标层有一定的厚度且成分稳定,花色以纯黑色不带浅色斑点为佳;玄武岩呈柱状节理发育,柱体直径不能太小,层面不能太发育,最少达到能截取650 mm×400 mm×700 mm的荒料。因此在寻找饰面玄武岩矿时要避开构造发育地段(李宝中等,2015)。玄武岩矿石作为饰面用石材原料物性相关指标应满足中华人民共和国建材行业标准《天然花岗石荒料》(JC/T204-2001),相关工业指标的国家标准:体积密度 $\geq 2.56 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率 $\leq 0.60\%$ 、抗压强度 $\geq 100.0 \text{ MPa}$ 、耐磨性 $\leq 2.2 \text{ g/cm}^2$ 、抗折强度 $\geq 8 \text{ MPa}$ 。根据原料放射性水平大小分为A、B、C类装饰装修材料,其放射性相关指标应满足国家标准《建筑材料放射性核素限量》(GB6566-2010)(表2)。

表2 饰面用玄武岩矿石放射性国家标准
Table 2 National standard for radioactivity of basalt ore for decoration

装饰装修材料类别	放射性核素限量
A类(产销与使用范围不受限制)	内照射指数 $I_{\text{Ra}} \leq 1.0$ 且外照射指数 $I_{\text{r}} \leq 1.3$
B类(适用于商场等Ⅱ类民用建筑)	不满足A类要求且内照射指数 $I_{\text{Ra}} \leq 1.3$,外照射指数 $I_{\text{r}} \leq 1.9$
C类(限用于建筑物外饰面及室外其他用途)	不满足A、B类要求且外照射指数 $I_{\text{r}} \leq 2.8$

注: $C=A/m$, 其中 $C(\text{Bq/kg}^{-1})$ 为放射性比活度, $A(\text{Bq})$ 为核素放射性活度, $m(\text{kg})$ 为质量;内照射指数 $I_{\text{Ra}} = C_{\text{Ra}}/200$,外照射指数 $I_{\text{r}} = C_{\text{Ra}}/370 + C_{\text{Th}}/260 + C_{\text{K}}/4200$ 。

1.1.5 水泥混合材用玄武岩矿石

玄武岩可代替黏土质原料生产硅酸盐水泥,能有效地改良安定性,有较高的经济效益和社会效益。利用活性混合材料制备高强度或高性能水泥基材料的关键是充分发挥混合材的四大效应:填充效应、火山灰效应、微晶核效应和微集料效应(袁恒菊,2020)。玄武岩灰性实验结果表明玄武岩具有一定的火山灰效应。从火山灰性角度看,玄武岩可做为水泥混合材使用。国家明确规定火山质硅酸盐水泥

中火山灰质混合材掺入量按重量分数计为20%~50%(蔡序珩等,1988;骆秉银等,1993)。用于水泥中的玄武岩矿石原料应满足《用于水泥中的火山灰质混合材料》(GB/T2847-2005),相关工业指标的国家标准:火山灰性检验必须合格,烧失量 $\leq 10\%$ 、 SO_3 含量 $\leq 3.5\%$ 、28天抗压强度比 $\geq 65 \text{ MPa}$ 。

1.2 玄武岩矿床分类

作为由火山溢流出的岩浆冷凝而成的矿床,玄武岩矿床均为火山喷发型矿床(李宝中等,2015;奚旺,2020;隆云,2022;黄从俊等,2023),因此以地质作用或矿床成因作为一般矿床的分类方法对玄武岩矿床并不适用。目前国内外学者对玄武岩矿床的分类普遍是以其工业用途的不同进行分类,如岩棉用玄武岩矿床(刘世俊等,1988)、拉丝用玄武岩矿床(周晓东等,2003)、纤维用玄武岩矿床(Vasil'eva et al., 2016; 张明胜等,2019)和建筑用玄武岩矿床(夏玉林等,2015)。以地球化学成分划分为钙碱性玄武岩矿床、拉斑玄武岩矿床和碱性玄武岩矿床的相关文献较少,本文将从此方向来介绍对应矿床的特征及典例。

在岩浆岩的分类标准中,常引入里特曼指数 $\delta = [w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})]^2 / [w(\text{SiO}_2 - 43)]$ 来衡量火成岩的碱性程度,作为一种大致判断玄武岩碱性程度的指标,但玄武岩的 SiO_2 含量较低,计算出的里特曼指数偏高,可能会导致对部分玄武岩类型判别不够准确,需结合文献中的标准矿物图解来判断。其中亚碱性($\delta < 3.3$)玄武岩里具体参考MacDonald等(1964)年提出用于区分火山岩的成分演化,在此基础上利用AFM图解法细分为钙碱性系列与拉斑玄武岩系列。

1.2.1 拉斑玄武岩矿床及典例

拉斑玄武岩的 SiO_2 含量一般在50%~53%之间,是亚碱性玄武岩的一种代表,贫碱,全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量在2%~4%,拉斑玄武岩矿床可在几乎所有的构造环境下形成。拉斑玄武岩矿石大多不含有橄榄石等基性矿物,与钙碱性玄武岩矿石物性特征类似,适合作为拉丝原材料。国内目前在江西、四川、浙江等地发现拉斑玄武岩矿床。

(1) 四川邻水西天玄武岩矿床

西天玄武岩矿床位于四川华蓥山褶皱带广安市邻水县,矿石储量约1594万吨,是国内一处超大型纤维用玄武岩矿床。区域出露寒武系中上统、奥陶系、志留系中下统、石炭系中统、二叠系、三叠系、侏罗

系及第四系,可见两条断层,矿床赋矿地层为上二叠统峨眉山玄武岩组,总体形成于陆相喷发环境。已探明矿体两条,均呈似层状产出,其中一条矿体长463.45 m,平均厚度31.56 m,另一条矿体长749.94 m,平均厚度28.27 m。产出矿石以块状构造为主,矿石由斜长石、辉石、绿泥石组成,并含少量黄铁矿,无石英、玉髓、燧石及外来杂质(黄从俊等,2023)。

西天玄武岩的CaO和 Al_2O_3 含量平均为7.73%和13.07%, Fe_2O_3 和FeO分别平均为6.26%和8.63%,MgO平均为5.02%, SiO_2 平均为47.28%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为3.71%,平均里特曼指数 $\delta=3.22<3.3$ (黄从俊等,2023)。姜凯(2021)通过研究川东地区华蓥山一带玄武岩显示,样品全部位于TAS图的亚碱性岩石范围内和AFM图的拉斑玄武岩系列内。经专业测定,西天玄武岩产出的柱状节理、块状和气孔状玄武岩满足纤维用玄武岩矿指标,开采成本低,收益大,属于拉斑玄武岩矿床类型。现已在广安市组建了世界首条玄武岩纤维2400孔漏板拉丝智能化窑池生产线,实现了资源优势向经济优势的转化。

(2) 四川雷波黑波罗玄武岩矿床

黑波罗玄武岩矿床位于四川省凉山彝族自治州雷波县,雷波县矿产资源总体规划2022官方文件显示,雷波县建筑玄武岩预测资源量为3730万 m^3 ,储量丰厚。其中黑波罗矿区范围内估算资源量(332)+(333)1510.2万 m^3 ,达到中型矿床规模,玄武岩矿石自然类型为灰绿色少斑状辉石玄武岩,矿物成分含辉石、斜长石、绿泥石等,少部分含杏仁体。

矿区玄武岩矿体在上二叠统峨眉山玄武岩(P_3em)下旋回第一次级旋回($\text{P}_3\text{em}^{2-1}$)间,似层状产出,矿体长820~1660 m,宽的104~603 m,平均厚度70.25~167.33 m。

黑波罗玄武岩的CaO和 Al_2O_3 平均含量为8.26%和13.45%, FeO 平均为13.93%,MgO平均为4.00%, SiO_2 平均为50.67%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为4.08%,平均里特曼指数 $\delta=2.17<3.3$,为亚碱性岩(奚旺,2020)。杨辉等(2018)对在马边、雷波地区峨眉山玄武岩样品进行主、微量元素分析显示,雷波地区玄武岩多位于AFM判别图的亚碱性玄武岩区和TAS图的拉斑玄武岩区域内,由此可推断出黑波罗玄武岩属于拉斑玄武岩系。黑波罗矿区玄武岩经物性测试满足国内建筑用玄武岩技术指标,化学成分满足玻璃纤维用玄武岩的化学指标,有

较大开发价值,属于典型的拉斑玄武岩矿床。

(3) 江西樟坞岭玄武岩矿床

樟坞岭玄武岩矿床位于江西省横峰县樟坞岭,保有资源储量815.26万吨,为小型纤维用玄武岩矿床,矿区地层主要为新元古界下青白口系登山群叶家组,下震旦统休宁组,目标矿床位于叶家组地层。区内两条断裂分布于矿区南北侧,并出露叶家组玄武岩、玄武安山岩、安山岩及少量的英安岩等火山岩。

矿区内含矿玄武岩走向延伸超过4000 m,产状北东,倾向北西,倾角 $35^\circ\sim 55^\circ$,呈层状、似层状、透镜体产出,勘探圈定矿体8层,长度为1400~4600 m,单层厚度为1.60~15.65 m,矿体形态、产状受层位控制,且连续性较好(王先广等,2022)。

樟坞岭玄武岩易采、资源储量规模大,且经测定单纤维强度平均达2576 MPa,超过国内大部分地区玄武岩纤维产品的拉伸强度,符合玄武岩纤维工业生产应用品质要求,作为玄武岩纤维的优质材料,樟坞岭玄武岩矿石有着很大的开采经济效益。王先广等(2022)通过研究矿区80件优质玄武岩矿石样品,显示其 SiO_2 含量平均为50.25%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为4.46%,里特曼指数 $\delta=2.74<3.3$,为亚碱性玄武岩。大部分落入TAS图的亚碱性系列,全部落入AFM图的拉斑玄武系列,属于拉斑玄武岩。樟坞岭玄武岩矿床是国内典型的拉斑玄武岩矿床之一。

(4) 新疆沙井子一带玄武岩矿床

新疆阿克苏沙井子一带玄武岩矿床位于新疆维吾尔自治区阿克苏市沙井子镇,根据阿克苏地区行政公署招商服务中心2023年文件公示,建筑用玄武岩矿储量为3425.18万吨,已达到大型矿床规模。玄武岩为塔里木盆地内分布最为广泛的岩石,沙井子玄武岩矿赋存于下二叠统库普库兹满组和开派兹雷克组地层中(杨树锋等,2005),矿体受地层控制,呈似层状,矿石自然类型为灰黑色玄武岩,矿物成分以斜长石、辉石、金属矿物等为主。

沙井子一带所在区域属于大陆板内环境,区域内火山活动主要发生在早二叠世早期及晚期,沙井子一带玄武岩是多期喷发作用的结果,属于塔里木大火成岩省。目标矿床富集于下二叠统开派兹雷克组上段(P_1kpz^2),下二叠统库普库兹满组(P_1kp)。 P_1kpz^2 在沙井子矿区中部,由基性玄武岩夹碎屑岩组成,在该地层的圈定了3条玄武岩矿体,矿体长

235~1 960 m, 宽 20~110 m, 平均厚度 4.94~47.42 m, 产出特征多为似层状(隆云, 2022)。

矿区开采的玄武岩 SiO_2 含量平均为 46.48%, 全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为 4.21%, 在部分文献中(姜常义等, 2004; 代友旭等, 2017)用硅碱 TAS 图解法将柯坪玄武岩定性为碱性玄武岩。而徐学义等(2002)研究显示柯坪地区玄武岩样品全部落入亚碱性系列和拉斑玄武岩系列。最新相关研究表明柯坪玄武岩应属于亚碱性系列。塔里木大火成岩省代表性样品柯坪玄武岩和英迈玄武岩的 $\text{Ol}^*-\text{Ne}^*-\text{Q}^*$ 三元图显示大部分玄武岩为硅饱和, 因此将其归类为亚碱性玄武岩, 并认为塔里木大火成岩省玄武岩的主体为拉斑玄武岩(Wang *et al.*, 2023)。经物性测定, 矿区内产出矿石平均抗压强度较高, 满足国内建筑用石料指标, 酸度与黏度系数满足岩棉用石料指标, 开采技术条件良好, 外部建设条件优越, 开发利用前景广阔, 因此将沙井子一带玄武岩矿床归类为拉斑玄武岩矿床。

1.2.2 钙碱性玄武岩矿床及典例

钙碱性玄武岩矿床是具有工业开采效益且以钙碱性玄武岩矿石为主要矿物产出的综合地质体, 是介于碱性玄武岩和拉斑玄武岩之间的过渡类型, 其矿石 SiO_2 含量一般为 47%~52%, Al_2O_3 含量较高。钙碱性玄武岩矿床常形成于岛弧环境或大陆边缘的活动构造带, 其矿石因少含捕虏晶和深源包体、质地均匀、无或少气孔和杏仁构造, 多发育柱状节理, 比较适合作拉丝原料。钙碱性玄武岩矿床相关研究文献及分布储量都明显少于其余两种类型玄武岩矿床, 分布范围相对局限, 常与中酸性岩(安山岩等)共生, 独立成矿的案列较为罕见, 如牡丹江海浪地区的钙碱性玄武岩与安山岩紧密共生(秦秀峰等, 2008)。由于当前公开文献中缺乏对独立钙碱性玄武岩矿床的相关报道, 本文暂未对此类矿床展开具体案例分析。

1.2.3 碱性玄武岩矿床及典例

碱性玄武岩矿床主要产出碱性玄武岩矿石。矿石 SiO_2 含量一般为 45%~49%, 富碱, 全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量>4%, 里特曼指数 $\delta>3.3$ 。碱性玄武岩矿床通常在大陆板内、大陆裂谷构造环境中发育, 碱性玄武岩有着较高的强度、优异的抗压性能以及良好的耐久性, 在工业上常作为建筑、水泥、饰面原料, 但由于碱性玄武岩的岩浆多来自深部地幔, 常含有基性矿物晶体以及幔源包体, 故不适合作为拉丝

原料。国内大部分建筑用玄武岩矿都是碱性玄武岩矿床, 如福鼎大郭山玄武岩矿床、吉林春阳镇南沟玄武岩矿床、贵州钟山玄武岩矿床、辽宁阜新老河土玄武岩矿床等。

(1) 辽宁阜新老河土玄武岩矿床

老河土玄武岩矿床位于辽宁省阜新市, 拥有易开采的地质条件及丰富的储量, 估算资源量超过 8 000 万吨, 达到大型矿床规模。该地区中生代以来受到太平洋板块俯冲的影响, 形成一系列规模巨大的北东向隆起和拗陷, 在伸展和收缩背景下形成规模较大的北东向韧性剪切构造及一系列的脆性构造, 并伴有褶皱与火山活动。褶皱构造区域上早期形成北东向阜新-义县构造盆地, 晚期形成北东向中生代黑山-彰武火山断陷向形盆地。矿区玄武岩矿床产出与分布受控于大陆边缘活动带构造环境下形成壳断裂控制彰武-黑山火山喷发带, 矿区内中生界侏罗系-白垩系义县组中的基性火山熔岩为目标矿床, 圈定矿体长 1 200 m, 宽 600 m, 最大埋深 200 m。矿石呈黑色, 矿物成分含有斜长石、橄榄石、普通辉石(杜峰等, 2010)。

阜新玄武岩矿石 CaO 和 Al_2O_3 含量平均为 6.63%和 13.28%, $^{\text{T}}\text{FeO}$ 平均为 7.46%, MgO 平均为 8.12%, SiO_2 平均为 52.10%, 全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为 5.78%, 平均里特曼指数 $\delta=3.67>3.3$, 阜新地区玄武岩样品在 TAS 图上全部落入碱性玄武岩系列(张宏福等, 2003)。开采出的矿石化学性能和结构稳定且副矿物种类较少, 是工业良好的建筑材料, 该地区矿床资源丰富、易采的地质条件, 具有显著经济开采效益, 为典型的碱性玄武岩矿床。

(2) 福鼎大嶂山玄武岩矿床

大漳山玄武岩矿床位于福建省福鼎市城南方向, 矿区探明优质玄武岩矿储量 3 812 万 m^3 , 为特大型玄武岩矿床。矿区大地构造位于福鼎-霞浦断裂带北段, 福鼎早白垩世火山喷发盆地的西南部, 矿区北东向断裂与北西向裂隙交会区域形成玄武岩喷发通道。

大嶂山玄武岩矿区处于大陆板内环境, 矿体平面分布似椭圆形, 长轴方向并呈岩筒状侵入下白垩统石帽山群下组下段地层中, 以杏仁状玻基橄榄玄武岩、中粗粒橄榄玄武岩为主要产出类型。粗粒橄榄玄武岩矿体似脚掌状, 长 720 m, 平均宽 210 m, 杏仁状玻基橄榄玄武岩矿体呈环带状, 长轴延伸 800 m, 宽数米至 180 m(李晓军等, 2009)。

大嶂山玄武岩物理性能良好,磨光及抛光性能好,产出“福鼎黑”矿石产品作为中高档的装饰材料以颜色墨黑、色调庄重高雅闻名于国内外,产品远销法国、日本、韩国等10多个国家,带来巨大的经济效益。大嶂山玄武岩矿床中开采的中粗粒橄榄玄武岩 SiO_2 含量平均为46.82%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为5.20%、平均里特曼指数 $\delta=7.08>3.3$,属于碱性玄武岩;杏仁状玻基橄榄玄武岩 SiO_2 含量平均为45.13%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)平均含量为6.04%,平均里特曼指数 $\delta=17.12>9$,属于过碱性玄武岩,是一种碱性玄武岩矿床。

2 玄武岩矿资源分布概况

2.1 世界范围内主要玄武岩矿储量及分布

世界范围内,玄武岩在各个地区与国家都有发现,在所有的构造环境中均有分布。因为玄武岩矿床全球分布范围广泛,数量繁多,制作一个详细的全球分布图将会变得十分冗杂;且玄武岩矿虽能作为一种矿产资源用于道路、建材等工业领域,其经济价值与勘探优先级低于金银等具有显著经济价值的矿产,即使是美国地质调查局里的矿产资源数据系统及全球矿产资源报告集内也未查找到相关详细玄武岩矿床相关资料与分布信息,笔者通过相关国内外文献整理出世界典型玄武岩矿分布图(图1)。在南美洲,玄武岩矿主要在巴西南部山脉地区米纳斯吉拉斯州、圣保罗州等地,临近巴西边境的乌拉圭地区及安第斯山脉周边地区进行开采。在北美洲,玄武岩矿主要分布在加拿大东北部群岛及西海岸至美国西部地区,如加拿大不列颠哥伦比亚省、魁北克省、艾伯塔省等地。美国蛇河平原(Potter *et al.*, 2018, 2019)和哥伦比亚河平原(Colón *et al.*, 2015)有大规模的玄武岩矿山分布,怀俄明州东北部、加利福尼亚州也有较大的玄武岩矿储量(王子焱等, 2020);夏威夷群岛、阿拉斯加半岛南部、西南部等地也富产玄武岩矿石。在亚洲,韩国、日本、乌兹别克斯坦吉扎克及纳曼干地区(Ismayilov *et al.*, 2022; Niyazova *et al.*, 2022)、吉尔吉斯斯坦、俄罗斯乌拉尔山脉附近、东西伯利亚(Buyantuev *et al.*, 2016)、印度德干高原地区等地都存在玄武岩矿床。在欧洲,玄武岩矿主要分布在捷克、乌克兰罗夫诺州、日托米尔州(Aidaraliev *et al.*, 2022)、意大利西西里岛、萨丁岛和西班牙加拉利群岛等地。在非洲,玄武岩矿区在坦桑

尼亚北部的基里马尼亚火山带、埃塞俄比亚丹吉拉火山地区、尼日利亚(Obiefuna and Nggada, 2014)、南非东、西部等地都有分布。在大洋洲,玄武岩矿主要分布在澳大利亚东部新南威尔士州悉尼周边地区、昆士兰州、澳大利亚州及新西兰奥克兰、罗托鲁瓦等地。据现有数据估计,全球玄武岩总量约在50~500万亿 m^3 之间,但由于很大一部分玄武岩未满足相关工业应用指标而不具有经济开采价值,不能当成矿石开采。作为大范围矿产资源玄武岩矿的总储量难以估计,研究未查明国外各国玄武岩矿储量的具体数值,但可以明确玄武岩矿产相较于其他矿产储量极其丰富。

2.2 中国范围内主要玄武岩矿储量及分布

自然资源部2022年公开的全国矿产资源储量统计数据显示,我国饰面用玄武岩矿石635.36万 m^3 ,矿床分布在吉林(李宝中等, 2015)、福建(李晓军等, 2009)、山东等地区。建筑用玄武岩矿石41 662.59万 m^3 ,在安徽、广西、四川、云南等均发现对应矿床。水泥混合材用玄武岩矿石57.05万t,矿床集中分布在四川。岩棉用玄武岩矿石177.56万t,矿床集中分布在吉林,辽宁铁岭县也发现有小型岩棉用玄武岩矿床。铸石用玄武岩矿石168.39万t,矿床集中分布在四川、黑龙江地区(表3,图2)。可见我国目前已探明玄武岩矿床大部分为建筑用玄武岩矿床,其他类型分布相对较少,其原因因为多方因素导致国内暂未形成适合作为拉丝原料类型的玄武岩矿床的勘探规范与评价体系,因此很多省份未设立此类探、采矿权(蒲庆隆, 2020)。从区域位置上看,东北地区,玄武岩矿床主要分布在松辽盆地的北部和东南部。华东地区,矿床主要分布于山东地区郯庐地带的西部和江浙地区。华南地区主要分布于广东省的雷州半岛与海南省雷琼一带。华中地区主要分布在鄂西地区和豫南地区。西北地区主要分布在新疆阿克苏地区、甘陕交界处;西南地区主要分布以峨边地区为主,统称为峨眉山玄武岩,其横跨川、黔、滇三省(孟欣等, 2023)。

3 玄武岩矿工业开发及利用现状

3.1 工业开发现状

因我国常规金属矿产资源铁矿的稀缺,玄武岩矿代替铁矿成为工业建筑原料的比例逐年升高。截至2022年,国内玄武岩开采量达8 540万t,消费量

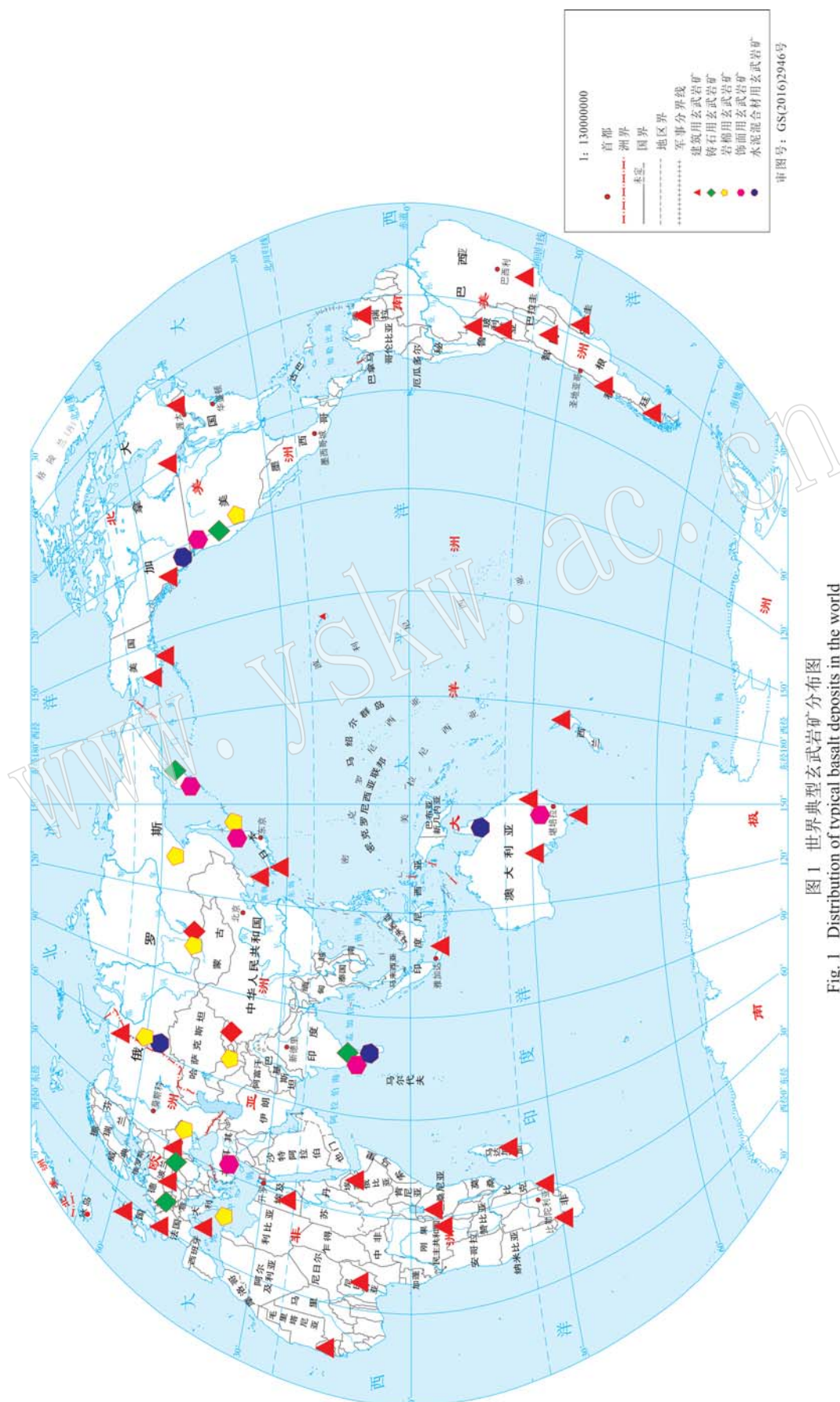


图1 世界典型玄武岩矿分布图
Fig.1 Distribution of typical basalt deposits in the world

表 3 中国玄武岩矿储量表(未计入港澳台地区)
Table 3 Statistics of basalt ore reserves in China

地区	水泥混合材用 玄武岩矿石/万 t	铸石用玄武岩 矿石/万 t	岩棉用玄武岩 矿石/万 t	建筑用玄武岩 矿石/万 m ³	饰面用玄武岩 矿石/万 m ³
全国	57.05	168.39	177.56	4 1662.59	635.36
内蒙古				403.90	
辽宁			4.56	1 028.00	
吉林			173.00	3 172.91	110.74
黑龙江		30.71			
江苏				331.60	
浙江				1 290.19	
安徽				5 121.17	
福建				0.55	52.86
江西				1 379.35	6.97
山东				12.80	464.79
湖北				80.09	
湖南				222.39	
广东				2 184.65	
广西				6 460.94	
海南				2 306.17	
四川	57.05	137.68		6 071.61	
云南				5 736.01	
甘肃				2 163.76	
新疆				3 696.50	

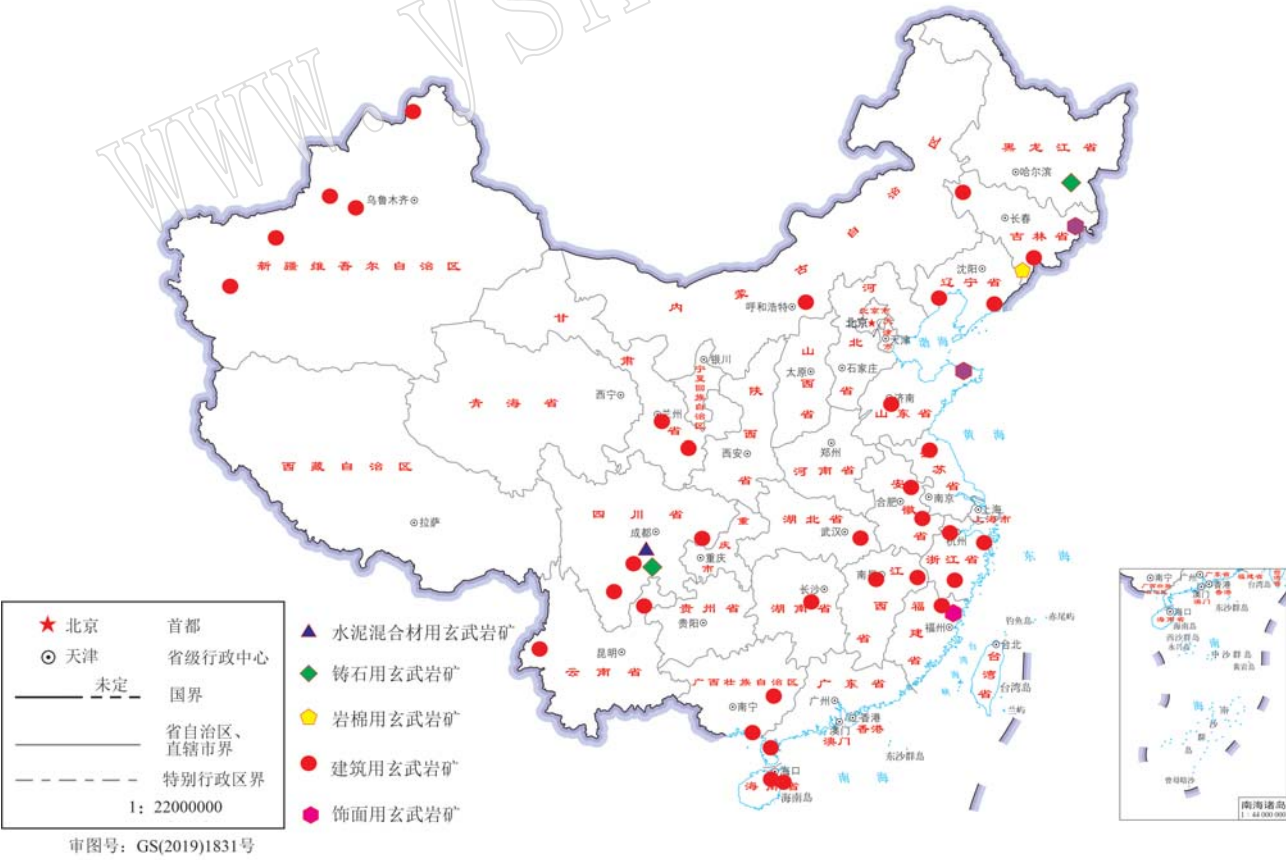


图 2 中国主要玄武岩矿分布图
Fig. 2 Distribution of major basalt deposits in China

达 8 150 万 t,并以近 7% 的年均增速快速增长(图 3)。其中国内玄武岩矿石大部分未经深加工便被直接当成建筑的原料消耗,建筑及建材领域使用占比达 98.5%,高端技术领域(纤维、鳞片、玻璃固化

等)使用仅占比 1.5%。国内玄武岩市场规模从 2015 年的 10.40 亿元增长到 2022 年的 22.41 亿元,8 年复合增长率达 11.59%(图 4)。可以明显看出国内玄武岩市场仍有着巨大的投资吸引力、良好的发

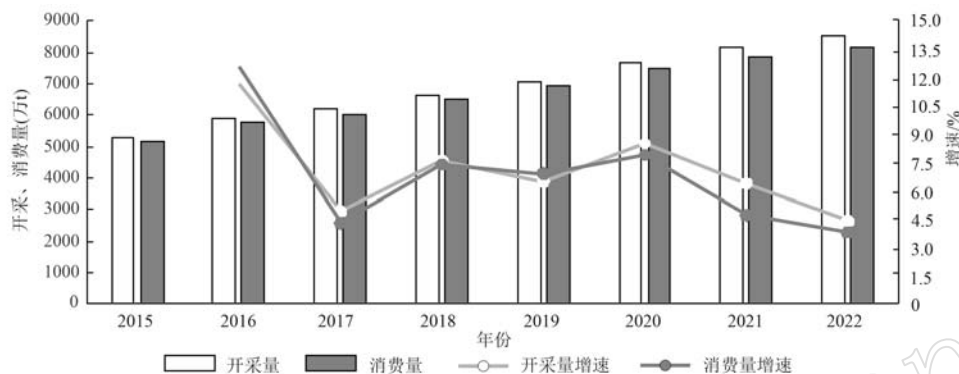


图 3 2015~2022 年中国玄武岩开采、消费量及增速图

Fig. 3 Basalt mining, consumption and growth rate in China from 2015 to 2022

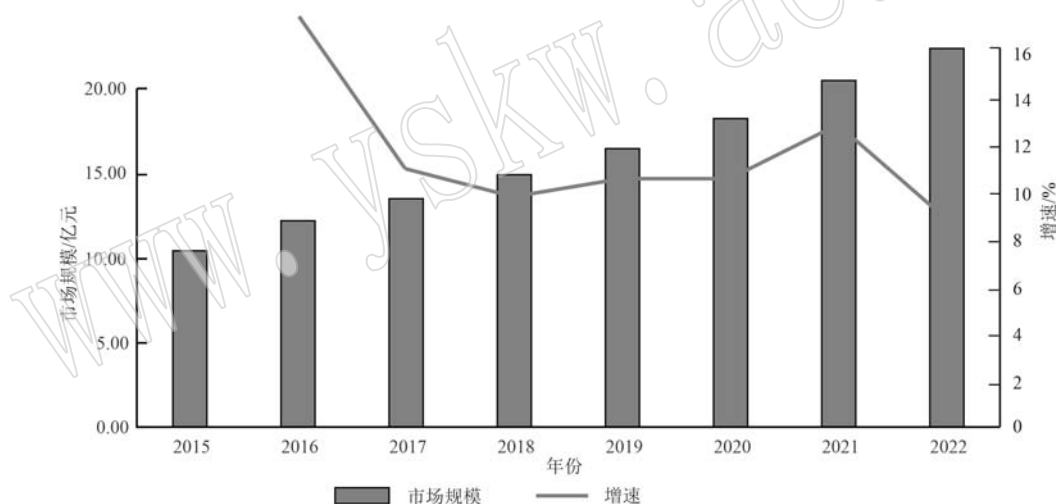


图 4 2015~2022 年中国玄武岩市场规模及增速图

Fig. 4 Scale and growth of China's basalt market from 2015 to 2022

展空间和广阔前景。

3.2 工业利用现状

(1) 连续玄武岩纤维

连续玄武岩纤维的英文名为 continuous basalt fiber, 简称 CBF。2024 年 6 月 3 日,嫦娥六号着陆器携带的一面由玄武岩纤维制成的“石头版”五星红旗在月球背面成功展开,这是我国首次在月球背面独立动态展示国旗。这面旗帜的月球亮相让 CBF 这种新型纤维材料被更多人所知。CBF 是以玄武岩矿石为主要原料经高温(通常 1 450℃ 以上)熔制和拉丝工艺制备的连续纤维,纤维单丝的直径为几微米到

二十几微米。与普通玻璃纤维比,差异在纤维中铁的组分,玄武岩纤维中的铁,一部分进入玻璃网络结构,一部分处于网络结构外(霍泳霖等, 2022)。与一般纤维相比拥有较好的耐高温性能和热稳定性,较低的热传导系数,较高的弹性模量和抗拉强度,较好的化学稳定性,较高的吸声因数,良好的电绝缘性和介电性能,较低的吸湿性以及天然的硅酸盐相溶性的优点(马燕玲等, 2022),同时还是一种绿色无机环保纤维材料,已被广泛应用于医疗设备、国防军工、航空航天、汽车、高温过滤织物等尖端领域(Meng *et al.*, 2021),被我国列入重点发展的四大纤

维之一。可以预见未来其将在航空航天领域上,如宇航服、太空舱、月球基地等场景有着更为广阔的应用空间。CBF 的制备与改良在世界各国都是研究的热门课题,目前 CBF 产业化发展处于俄罗斯、乌克兰和

中国三足鼎立的局面(王子焱等, 2020)。我国 CBF 产业自给自足不依赖进口,产量每年平稳增长,在满足国内供给需求的同时稳定输送国外,出口量也保持较为稳定的增长势头(图5),应完善纤维用玄

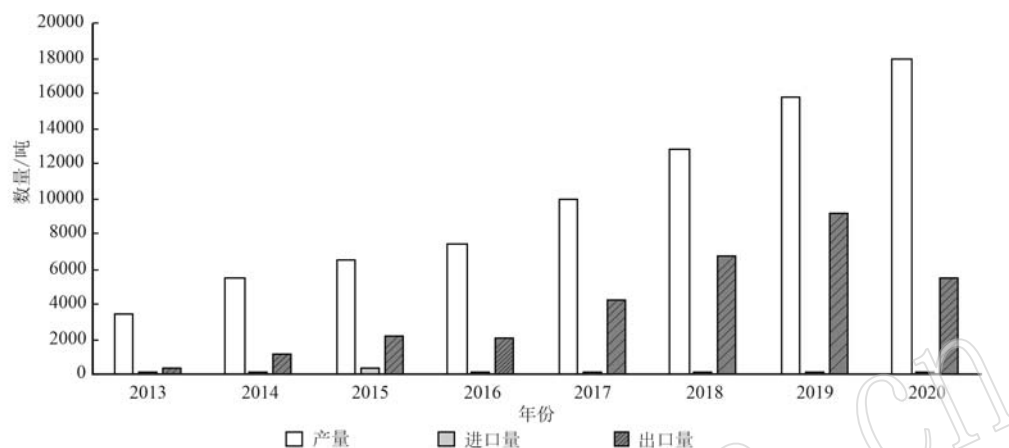


图5 2013~2020年中国CBF产量及进出口图

Fig. 5 Chin's CBF output, import and export volume from 2013 to 2020

武岩矿评价体系制定行业勘查规范,筛选优质玄武岩原料,进一步优化 CBF 生产技术,保持国际领先地位。

(2) 玄武岩岩棉

岩棉是以天然岩石为主要原料经熔融后制成的具有一定长度范围的絮状纤维,是一种经济实惠的建筑保温、隔热材料。在现代工业生产中的玄武岩岩棉多以优质玄武岩矿石为原料,经高温玻璃的熔制和调整采用离心机高速离心成纤维,同时喷入一定量粘结剂集棉成型,后经固化、干燥和切割,制成毡、条、管、粒状、板状等不同规格和用途的岩棉产品(霍泳霖等, 2022),原料中玄武岩主要为生产岩棉提供了酸性氧化物氧化硅和氧化铝。我国岩棉产业起步于 20 世纪 50 年代,起步较晚,以吸收转化国外技术为主,目前工业上普遍采用冲天炉熔化岩棉熔体技术,具体工业流程见图 6。

(3) 玄武岩铸石

将玄武岩矿石经过熔化(1 400℃ 以上)铸造、结晶处理,最后退火便成为了工业上常用的“铸石”。玄武岩铸石是一种硅酸盐结晶材料,在我国也把玄武岩铸石也称为玄武岩微晶玻璃,这种微晶玻璃性能优异,深受我国建筑装饰业青睐(孙帅, 2010)。铸石具有很好的耐腐蚀、耐磨和较高的抗压、抗冲击、抗弯等性能,也常被应用于电力、化工、煤炭、钢铁等行业。目前常用两类方法制备玄武岩铸石,一类为单一原料生产技术(理想玄武岩原料直接投炉

生产),一类为配合料生产(玄武岩为原料配多种辅料生产),前者原料单一、工艺简化、质量较好但所需理想低硅玄武岩原料苛刻,现今工业常采用配合料生产玄武岩铸石,具体工艺流程见图 7。

(4) 玄武岩火山灰水泥混合材料

在生产水泥时,为改善水泥性能、调节水泥标号而加入的人工或天然矿物材料,称为水泥混合材料,将玄武岩矿石作为原料添加的(参入质量 5% 以上)称为玄武岩水泥混合材。其作用机理为玄武岩玻璃质结构中含有的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 具有一定的水化活性,作水泥混合材或混凝土掺和料时会与水泥水化产物 CaSO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成水化硅酸钙凝胶和钙矾石晶体,并与周围水泥水化产物紧密结合,形成致密结构,提高抗硫酸盐及抗氯离子渗透侵蚀性和防水性,从而提高水泥的硬化强度(蔡攀, 2017),经过大量的工业实践,玄武岩掺量不宜过高,控制在 5%~14% 质量分数内表现最佳(袁恒菊, 2020)。现工业上水泥混合材料大量使用玄武岩矿石作为混合材料,提高了水泥的质量,降低消耗,节约了成本开支,具有很大的经济收益。

(5) 玄武岩玻璃陶瓷固化体

在新能源核能利用领域,产生的放射性废物生物毒性极大,如何处理核废物成为核工业的一大难题,其中一种工业上的经济可行方法为将核废物固化进行深地质处理。天然玄武岩经过自然界高温熔

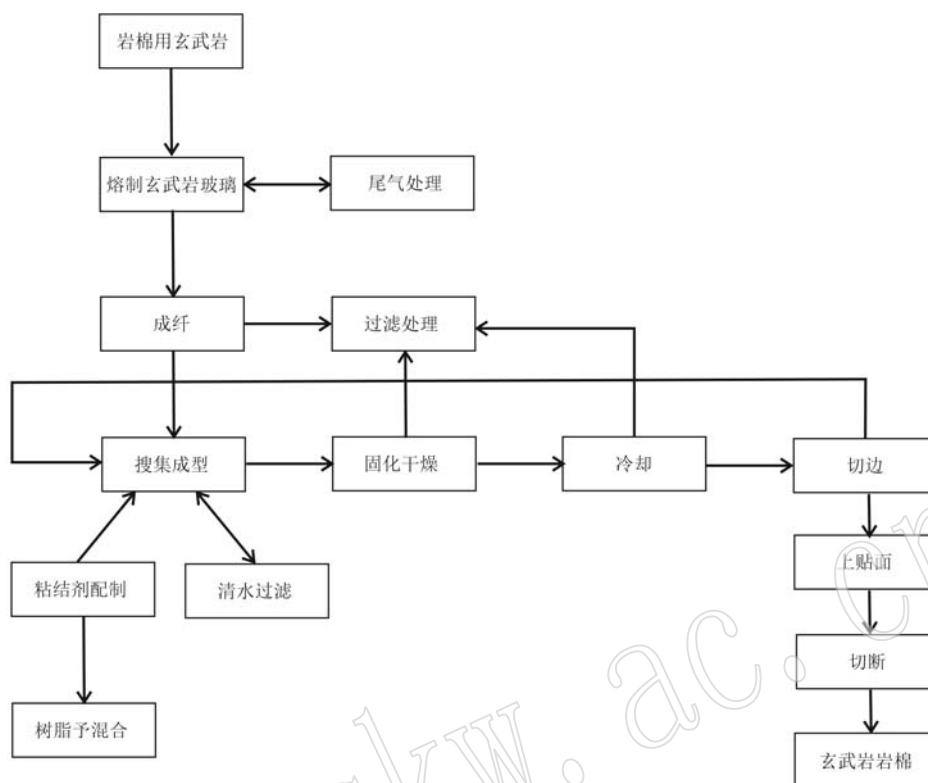


图6 玄武岩岩棉工艺流程图(据霍泳霖等, 2022)

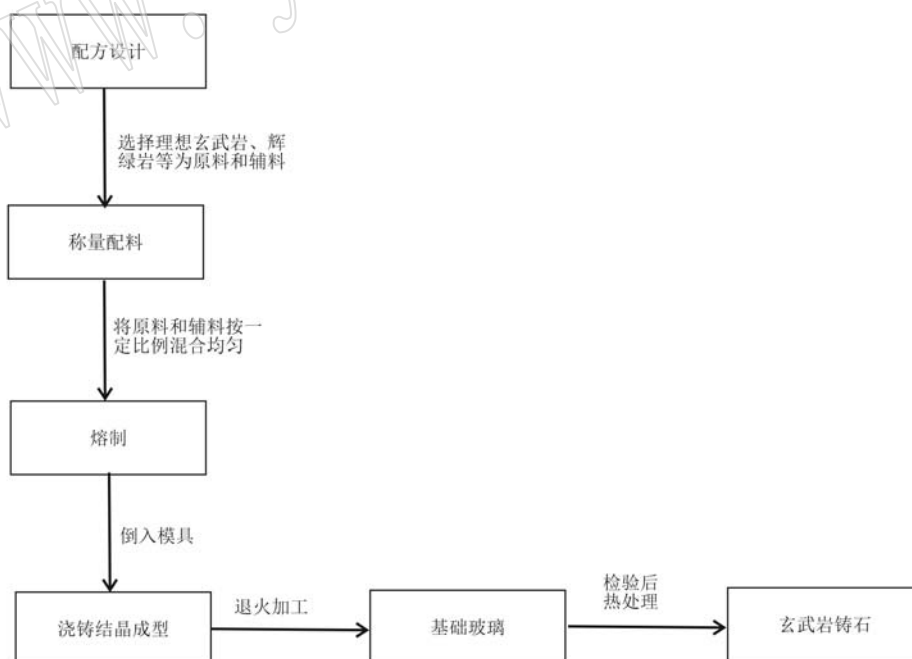
Fig. 6 Process flow chart of basalt rock wool (modified from Huo Yonglin *et al.*, 2022)

图7 玄武岩铸石工艺流程图(据孙帅, 2010)

Fig. 7 Process flow chart of basalt cast stone (modified from Sun Shuai, 2010)

融的天然选择,具有很好的形成玻璃网络结构的能力,一旦将其再次加热至高温熔融、再析晶,很容易

形成稳定的玻璃陶瓷体(霍泳霖等, 2022)。玄武岩玻璃陶瓷固化体满足核放射废物的工业处理指标,

其包容量大,能一次性固化核废物中的所有组分,对生产设备要求不高的优点使之有望成为工程化的核废物固化处理技术。20 世纪美国已率先将玄武岩玻璃陶瓷投入于处理商业及军事上产生的核废料,但

总体上该技术在全球范围内仍然处于起步研究阶段。我国学者霍泳霖等(2022)申请了一种放射性废物岩岩浆岩玻璃陶瓷固化体的制备方法专利,其具体技术路线见图 8。

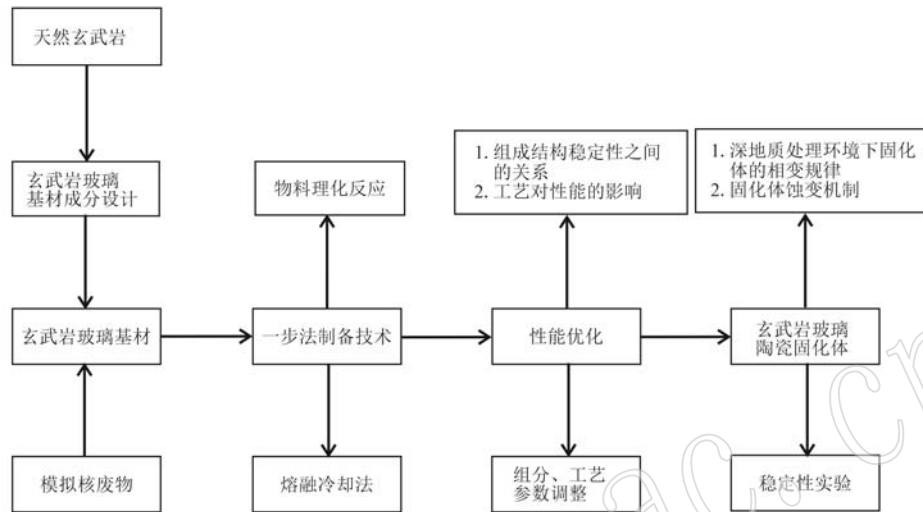


图 8 玄武岩玻璃陶瓷固化体工艺流程图(据霍泳霖等, 2022)

Fig. 8 Process flow chart of basalt glass-ceramic solidified body (modified from Huo Yonglin *et al.*, 2022)

(6) 玄武岩固碳技术

玄武岩矿石作为地表分布最为广泛的火山岩类矿石,普遍发育的原生气孔和冷凝收缩缝使其具备良好的储渗能力。埋藏于地下浅层的玄武岩不仅可以存储地下水及地热资源,还可以为 CO_2 温室气体的固化封存提供场所,是节能减排、应对全球变暖有效的技术手段。“双碳”目标背景下,碳封存技术成为学术界的焦点(任俊童等, 2023)。玄武岩中的橄榄石、辉石和长石等硅酸盐矿物中+2 价金属离子含量远高于其他岩类,是实现 CO_2 矿化封存的最佳岩类(高志豪等, 2023),也是封存 CO_2 的较为前沿的固碳方法之一。其固碳的原理为大气中 CO_2 溶于水形成 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 阴离子与玄武岩矿石风化释放出的溶于水阳离子发生反应,促使其矿物成分中钙、镁等金属元素发生碳酸盐化反应,形成稳定的碳酸盐产物(李万伦等, 2022),相关文献表明适合进行碳封存的玄武岩种类包括 CFB(大陆溢流型玄武岩)、OPB(洋底高原玄武岩)和 MORB(洋中脊玄武岩)。美国 Wallula 超临界 CO_2 矿化封存项目为世界上第一个证明 CO_2 在玄武岩层中可实现快速矿化的现场实验(Mcgrail *et al.*, 2017)。将 CO_2 气体井口加热,增压以液态注入井内,通过盐化反应,注入的两年内便形成了固定为稳定的碳酸盐矿物且并未发

现 CO_2 泄露,Wallula 矿化封存项目的成功可为我国的节能减排低碳发展提供一种可行的技术思路。

(7) 玄武岩粉末肥料

玄武岩粉末除了可用风化碳汇技术进行地表固碳外,也可用于改善土壤肥力,对促进作物生长、粮食增产有着积极的作用(任俊童等, 2023)。这项研究对农业及采矿业都有着重要的意义,既可以为尾矿创造一种替代处理方法,也可以提高当地农场的生存能力和可持续性(Nunes *et al.*, 2014)。传统化肥(NPK)的过度使用会造成环境的破坏,污染水源、藻类扩散、水生生态系统富营养化与 NPK 的滥用息息相关,矿物粉尘作为天然肥料的推广能极大减少 NPK 带来的环境压力。在众多硅酸盐石粉尘里玄武岩粉尘内富含碱性 Mg、Fe 硅酸盐,能够诱导土壤的 pH 校正,也能为植物所必须的 Ca、K、P 等微量元素提供来源(Terto *et al.*, 2022),相关调查显示比起传统化肥使用玄武岩粉末施肥还可以节省近 50% 的成本,在巨大的经济效益下,目前已成为各个国家农业的一个热门研究课题。

3.3 工业开发利用展望

目前我国玄武岩的开发利用在工程建设领域应用最广,如建筑材料、水泥混合材、公路、铁路等,岩棉、铸石技术也较为成熟并广泛投入于市场,但在玄

玄武岩连续纤维方向上仍处于起步阶段。因其优秀的物性特征,玄武岩纤维将会成为玄武岩应用领域内的热门课题,预计在不久的未来玄武岩连续纤维研究方向上将会有新的技术突破,市场规模化产业化指日可待。在核工业领域上,由于核安全问题的敏感性,核废料固化技术将会成为世界各国角逐的方向之一,玄武岩玻璃陶瓷固化体有望成为固化技术的突破方向。在实现“双碳”目标上,玄武岩可作为CO₂地质封存技术的潜力封存地质体。在农业领域上,以玄武岩为材料的天然矿物肥料在成本与环保上对比传统肥料具有一定的优势性,有望大规模投入农业生产。未来玄武岩将会以资源的角色为我国工业、国防、环保、农业等领域提供更多强有力的支撑。

4 结语

(1) 自然界中玄武岩分布广泛、规模庞大,其中满足工业指标具有经济开采价值的玄武岩才能被称为玄武岩矿。目前工业上常见的玄武岩矿石类型有建筑用、铸石用、岩棉用、饰面用、水泥混合材用5种类型。

(2) 玄武岩矿床以地球化学成分的差异可分为拉斑、钙碱性、碱性玄武岩矿床,其中拉斑、钙碱性玄武岩物性特征类似,适合作为拉丝原料,碱性玄武岩多用于充当建筑材料。中国大部分建筑用玄武岩矿为碱性玄武岩矿床,在国内各个地区均有发现。

(3) 中国已探明玄武岩矿床规模不一,矿床在东北、华北、华东、中南、西北、西南地区均有分布。国内玄武岩矿床分布广泛,矿石质量较好,各地区玄武岩矿石化学组分变化较大,为资源开发利用提供了更多的可能。已探明矿床以建筑用玄武岩矿床为主,因暂未形成适合作为拉丝原料类型的玄武岩矿床的勘探规范与评价体系,很多省份未设立此类探、采矿权,严重制约了玄武岩矿产业多样化的发展。

(4) 在工业开发与利用中,国内玄武岩矿石在建筑及建材领域消费占比为98.5%,其他领域占比为1.5%。国内工业上对玄武岩需求逐年增高,开采与消耗量均以年均7%的趋势上升,市场规模年均复合增长率超过10%,具有良好的市场前景与开发潜力。除用在纤维、岩棉等工业领域外也可作为核废物固化材料、固碳技术原料和农业肥料,未来玄武岩矿石及其深加工产品应用于更广阔的领域已成为必然趋势。

致谢 本文的顺利完成得益于课题组同学们的协力帮助、审稿专家的专业建议以及编辑团队的严谨指导,在此谨向各方致以诚挚感谢。

References

- Aidaraliev Z, Rysbaeva I and Atyrova R. 2022. Suitability of Suluu-Terek basalt deposits for stone casting[J]. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(1): 1~14.
- Buyantuev L, Kondratenko A, Khmelev A, *et al.* 2016. The study of the mineral and chemical features of the Trans-Baikal basalt deposit to generate melt using the electric arc method[J]. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13(2): 1 063~1 068.
- Colón D P, Bindeman I N, Ellis B S, *et al.* 2015. Hydrothermal alteration and melting of the crust during the Columbia River Basalt-Snake River Plain transition and the origin of low- $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites of the central Snake River Plain[J]. *Lithos*, 224~225: 310~323.
- Cai Xuheng, Zhou Huicheng, He Keyin, *et al.* 1988. Application of basalt in material industry[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, (4): 61~66 (in Chinese).
- Cai Pan. 2017. *Cement and Concrete Admixtures for Adaptive Basalt Admixture*[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Du Feng, Jiao Feng and Liu Zhihua. 2010. Fuxin Liaoning Province, geological characteristics of basalt[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 29 (S1): 23~24 (in Chinese with English abstract).
- Dai Youxu, Zhang Xinyong, Yan Kun, *et al.* 2017. Zircon U-Pb chronology, geochemical characteristics of the Early Permian basalt in the Keping Area, Xinjiang and their geological significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhihao, Xia Changyou, Liao Songlin, *et al.* 2023. Progress of methods for assessing CO₂ mineralization storage potential in basalt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 29(1): 66~75 (in Chinese with English abstract).
- Huang Congjun and Li Minghui. 2023. Geology and genesis of Xitian super-large basalt deposit in Huayingshan fold belt, Eastern Sichuan [J]. *Geology and Resources*, 32(3): 300~310 (in Chinese with English abstract).
- Huo Yonglin, Huo Jichuan, Zhang Xingquan, *et al.* 2022. Development and utilization of basalt[J]. *Materials Reports*, 36(6): 1~11 (in Chinese with English abstract).

- Ismayilov K, Shokosimov I and Karimova K. 2022. Study of laboratory-technological researches on the validity of six samples of "Osmonsoy" basalt deposits of Jizzakh Region and "Karabulak" basalt deposits of Namangan Region in the Republic of Uzbekistan for the production of different (Continuous, coarse, super delicate and fine) fibers[J]. The 1st International Conference on Problems and Perspectives of Modern Science, (A): 030023~1~030023~7.
- Jiang Changyi, Zhang Pengbo, Lu Dengrong, *et al.* 2004. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Kalpin basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions[J]. Geological Review, 50(5): 492~500 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Kai. 2021. Genesis and Thermal Effect of Permian Basalts in Eastern Sichuan Basin[D]. China University of Petroleum (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li Baozhong and Gao Yan. 2015. Geological characteristics and development and utilization of Nangou decorative basalt mine in Chunyang Town, Wangqing County, Jilin Province[J]. Stone, (7): 29~31 (in Chinese).
- Li Wanlun, Chen Jing, Jia Lingxiao, *et al.* 2022. Research progress of CO₂ geological sequestration in basalts[J]. Geological Review, 68(2): 649~657 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaojun and Xiang Jundao. 2009. Preliminary study on the geological characteristics and development and utilization prospects of the Dazhangshan basalt deposit in fuding[J]. Staats Science, (7): 18~20 (in Chinese).
- Liu Ling. 2003. Successful application of basalt casting technology in blast furnace slag flushing ditch[J]. Shandong Metallurgy, 25(s1): 79~80 (in Chinese).
- Liu Shijun and Zhou Hongwei. 1988. Geological characteristics and exploration methods of the basalt deposit used for rock wool in Heishantou[J]. Non-metallic Ore, 12(4): 8~9 (in Chinese).
- Luo Bingyin, Wei Guang, Sha Yan, *et al.* 1993. Using basalt as cement admixture[J]. Cement Technology, (2): 49~50 (in Chinese).
- Long Yun. 2022. Geological characteristics of basalt deposit in Shajingzi Area, Aksu, Xinjiang[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 152(2): 22~24 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yanling, Shang Hong and Wang Yunping. 2022. Application of continuous basalt fibers in bed panels of medical imaging detection equipment[J]. Machinery, 60(12): 56~58 (in Chinese).
- Macdonald G A and Katsura T. 1964. Chemical composition of Hawaiian lavas[J]. Journal of Petrology, 5(1): 82~133.
- Mcgrail B P, Schaef H T, Spane F A, *et al.* 2017. Wallula basalt pilot demonstration project: Post-injection results and conclusions[J]. Energy Procedia, 114: 5 783~5 790.
- Meng Xin, Huang Hao and Liu Xiangrong. 2023. Basalt development and utilization prospects[J]. Create Living, (7): 227~232 (in Chinese).
- Meng Yong, Liu Jianxun, Xia Yong, *et al.* 2021. Preparation and characterization of continuous basalt fibre with high tensile strength[J]. Ceramics International, 47(9): 12 410~12 415.
- Niyazova S M, Kadyrova Z R, Usmanov K L, *et al.* 2022. Physicochemical properties of andesitic basalt mineral fibers[J]. Glass and Ceramics, 79(3): 107~111.
- Nunes J, Kautzmann R and Oliveira C. 2014. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil)[J]. Journal of Cleaner Production, 84: 649~656.
- Obiefuna I G and Ngada I S. 2014. Geochemical and mineralogical composition of Biu basalt deposit, Biu Area NE Nigeria[J]. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 6(5): 241~250.
- Potter K E, Champion D E, Duncan R A, *et al.* 2019. Volcanic stratigraphy and age model of the Kimama deep borehole (Project Hotspot): Evidence for 5.8 million years of continuous basalt volcanism, central Snake River Plain, Idaho[J]. Geosphere, 15(3): 736~758.
- Potter K E, Shervais J W, Christiansen E H, *et al.* 2018. Evidence for cyclical fractional crystallization, recharge, and assimilation in basalts of the Kimama drill core, central Snake River Plain, Idaho: 5.5-million-years of petrogenesis in a mid-crustal sill complex[J]. Frontiers in Earth Science, 6: 1~17.
- Pu Qinglong. 2020. Preliminary evaluation of Emeishan basalt in Hezhang County, Guizhou Province as a continuous basalt fiber ore[J]. Western Exploration Project, 32(1): 156~158 (in Chinese).
- Qiao Huimin. 2023. Discussion on the technical performance of rock wool board for building external wall insulation[J]. Shanxi Architecture, 49(15): 119~122 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiufeng, Xu Yigang, Zhang Huihuang, *et al.* 2008. Genetic diversity of continental subalkaline volcanic rocks: A case study of Dunhua Mishan and Dongning volcanic belts[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2 501~2 514 (in Chinese with English abstract).
- Ren Juntong, Yang Jianghai, Cheng Liang, *et al.* 2023. Weathering carbon sorage in Emeishan large igneous province: Experimental study on water-rock reaction of basalt powder[J]. Acta Geologica Sinica, 97(9): 3 087~3 099 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shuai. 2010. Preparation and Study on Basalt Glass-ceramis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University (in Chinese with English abstract).
- Terto L C, Nelson G S, Silva M H H, *et al.* 2022. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition[J]. Journal of Agri-

- culture and Food Research, 10: 100443.
- Vasil'eva A A, Kychkin K A, Anan'eva S E, *et al.* 2013. Investigation into the properties of basalt of the Vasil'evskoe deposit in Yakutia as the raw material for obtaining continuous fibers [J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 14(9): 516~520.
- Wang Xianguang, Zhang Rupeng, Xu Yongbo, *et al.* 2022. Geological characteristics and drawing test of the first discovered Zhangwuling basalt fiber deposit in Jiangxi Province [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 45(3): 201~206 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z C, Zhang Z C, Marc K R, *et al.* 2023. Tracing decarbonated eclogite in the mantle sources of Tarim continental flood basalts using Zn isotopes [J]. Geological Society of America Bulletin, 135(7/8): 1 768~1 782.
- Wang Ziyang, Zhong Haotian, Jia Yu, *et al.* 2020. Analysis of current status of continuous basalt fiber production and product development [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 40(3): 161~178 (in Chinese with English abstract).
- Wei Ning, Li Zhongyu and Liu Han Yunfei. 2023. Study on the mechanical properties of cement stabilized porous basalt crushed stone pavement subgrade in cold areas [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 41(2): 72~76 (in Chinese with English abstract).
- Xi Wang. 2020. Geological characteristics and prospect of development and application of basalt deposit in Leibo County, Sichuan Province [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 141(3): 32~36 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yulin and Zhu Wenjie. 2015. Discussion of monitoring analysis on soil and water conservation—with development and utilization project of Huashan building basalt ore deposit as an example [J]. Water Ecological Protection and Management, (1): 33~36 (in Chinese with English abstract).
- Xin Ya. 1995. Shandong electric power Penglai cast stone factory's Gangwang brand basalt cast stone composite pipe won the gold medal at the 7th China New Technology and New Products Expo. [J]. Building Materials Industry Information, (24): 10 (in Chinese).
- Xu Xueyi, He Shiping, Ma Zhongping, *et al.* 2002. The Permian volcanic rocks from Kumurwuzuke area, Keping County [J]. Northwestern Geology, 35(3): 35~41 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hui, Ma Jiyue, Zhu Bing, *et al.* 2018. Geochemical characteristics and genesis of the Emeishan basalt in the Mabian-Leibo Region, Sichuan [J]. Acta Geologica Sichuan, 38(1): 27~33+38 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Ji Dengwu, *et al.* 2005. Geological process of Early to Middle Permian magmatism in Tarim Basin and its geodynamic significance [J]. Geological Journal of China Universities, 11(4): 504~511 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Hengju. 2020. Application of basalt as a mixed material in cement production [J]. Cement, (S1): 108~109 (in Chinese).
- Zhang Hongfu and Zheng Jianping. 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts in North China: A case study of Fuxin, Liaoning [J]. Science Bulletin, 48(6): 603~609 (in Chinese).
- Zhang Kun, Wang Haiyang and Chang Jinke. 2020. A brief discussion on the preparation of C50 high strength concrete with basalt pebble rolling mechanism sand [J]. Jushe, (36): 16~19 (in Chinese).
- Zhang Mingsheng, Xu Jiabin, Fei Guangchun, *et al.* 2019. The development and utilization prospect of fiber basalt in Yanyuan area, Sichuan [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 37(12): 51~54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shengze, Zhao Feng, Lü Shaoyu, *et al.* 2018. Rock wool basalt resource and its application significance of Yunihe in Liupanshui City [J]. Guizhou Geology, 35(1): 20~25 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaodong, Feng Junling and Su Guifen. 2003. Geological characteristics and development prospects of the Xiaowangou wire drawing basalt deposit in Jixi City [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 33(3): 44~45 (in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡序珩, 周会成, 贺可音, 等. 1988. 玄武岩在材料工业中的应用 [J]. 矿产综合利用, (4): 61~66.
- 蔡攀. 2017. 以玄武岩混合材的水泥与混凝土外加剂适应性研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学.
- 杜峰, 焦峰, 刘治华. 2010. 辽宁省阜新玄武岩矿床地质特征 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 29(S1): 23~24.
- 代友旭, 张新勇, 阎琨, 等. 2017. 新疆柯坪地区早二叠世玄武岩年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质科技情报, 36(1): 1~13.
- 高志豪, 夏昌佑, 廖松林, 等. 2023. 玄武岩 CO₂ 矿化封存潜力评估方法研究现状及展望 [J]. 高校地质学报, 29(1): 66~75.
- 黄从俊, 李明辉. 2023. 川东华蓥山褶皱带西天超大型玄武岩矿床地质特征及岩石成因 [J]. 地质与资源, 32(3): 300~310.
- 霍泳霖, 霍冀川, 张行泉, 等. 2022. 玄武岩的开发利用进展 [J]. 材料导报, 36(6): 1~11.
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 等. 2004. 柯坪玄武岩的岩石学、地球化

- 学、Nd、Sr、Pb 同位素组成与岩石成因[J]. 地质论评, 50(5): 492~500.
- 姜 凯. 2021. 川东二叠系玄武岩成因及其热效应研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 李宝中, 高 言. 2015. 吉林省汪清县春阳镇南沟饰面玄武岩矿地质特征及开发利用[J]. 石材, (7): 29~31.
- 李万伦, 陈 晶, 贾凌霄, 等. 2022. 玄武岩 CO₂ 地质封存研究进展[J]. 地质论评, 68(2): 648~657.
- 李晓军, 向军道. 2009. 福鼎大嶂山玄武岩矿床地质特征及开发利用前景初探[J]. 海峡科学, (7): 18~20.
- 刘 玲. 2003. 玄武岩铸石技术在高炉冲渣沟中应用成功[J]. 山东冶金, 25(s1): 79~80.
- 刘世俊, 周宏伟. 1988. 黑山头岩棉用玄武岩矿床地质特征及勘探方法[J]. 非金属矿, 12(4): 8~9.
- 隆 云. 2022. 新疆阿克苏沙井子一带玄武岩矿床地质特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, 152(2): 22~24+55.
- 骆秉银, 魏 广, 沙 延, 等. 1993. 用玄武岩作水泥混合材[J]. 水泥技术, (2): 49~50.
- 马燕玲, 尚 洪, 王云平. 2022. 连续玄武岩纤维在医用影像检测设备床面板中的应用[J]. 机器制造, 60(12): 56~58.
- 孟 欣, 黄 浩, 刘向荣. 2023. 玄武岩开发利用前景[J]. 居业, (7): 227~232.
- 蒲庆隆. 2020. 贵州省赫章县峨眉山玄武岩作为连续玄武岩纤维矿石的初步评价[J]. 西部探矿工程, 32(1): 156~158.
- 乔慧敏. 2023. 建筑外墙外保温用岩棉板技术性能探讨[J]. 山西建筑, 49(15): 119~122.
- 秦秀峰, 徐义刚, 张辉煌, 等. 2008. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化-密山和东宁火山岩带为例[J]. 岩石学报, 24(11): 2 501~2 514.
- 任俊童, 杨江海, 程 亮, 等. 2023. 峨眉山大火成岩省的风化碳汇效应: 玄武岩粉末水-岩反应实验研究[J]. 地质学报, 97(9): 3 087~3 099.
- 孙 帅. 2010. 玄武岩矿渣微晶玻璃的制备研究[D]. 镇江: 江苏大学.
- 王先广, 张如鹏, 徐永波, 等. 2022. 江西首次发现的樟坞岭玄武岩纤维矿床特征及拉丝试验研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 45(3): 201~206.
- 王子焱, 钟昊天, 贾 钰, 等. 2020. 连续玄武岩纤维生产与制品开发现状分析[J]. 矿产保护与利用, 40(3): 161~178.
- 魏 宁, 李仲玉, 刘汉云飞. 2023. 寒冷地区水泥稳定多孔玄武岩碎石路面基层力学性能研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 41(2): 72~76.
- 奚 旺. 2020. 四川雷波黑波罗矿区玄武岩矿床地质特征及开发利用前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 141(3): 32~36.
- 夏玉林, 朱文杰. 2015. 对水土保持的监测分析探讨——以花山建筑用玄武岩矿床开发利用项目为例[J]. 水资源开发与管理, (1): 33~36.
- 辛 亚. 1995. 山东电力蓬莱铸石厂刚王牌玄武岩铸石复合管荣获第七届中国新技术新产品博览会金奖[J]. 建材工业信息, (24): 10.
- 徐学义, 何世平, 马中平, 等. 2002. 新疆柯坪库木如吾祖克地区二叠纪火山岩[J]. 西北地质, 35(3): 35~41.
- 杨 辉, 马继跃, 朱 兵, 等. 2018. 四川马边、雷波地区峨眉山玄武岩地球化学特征及其成因[J]. 四川地质学报 38(1): 27~33+38.
- 杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 等. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义[J]. 高校地质学报, 11(4): 504~511.
- 袁恒菊. 2020. 玄武岩作混合材在水泥生产中的应用[J]. 水泥, (S1): 108~109.
- 周晓东, 冯俊岭, 苏桂芬. 2003. 鸡西市小湾沟拉丝用玄武岩矿床地质特征及开发利用远景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 33(3): 44~45.
- 张 坤, 汪海洋, 常金科. 2020. 浅谈玄武岩卵石轧制机制砂配制 C50 高强混凝土[J]. 居舍, (36): 16~17+19.
- 张宏福, 郑建平. 2003. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因: 以辽宁阜新为例[J]. 科学通报, 48(6): 603~609.
- 张明胜, 许家斌, 费光春, 等. 2019. 四川省盐源县纤维用玄武岩开发利用前景[J]. 中国资源综合利用, 37(12): 51~54.
- 张胜泽, 赵 锋, 吕绍玉, 等. 2018. 六盘水市淤泥河岩棉用玄武岩资源及开发意义[J]. 贵州地质, 35(1): 20~25.