

# 玄武岩材料的“源—汇”控制论

牛柏然<sup>1</sup>, 姚宇<sup>2,3</sup>, 郝小庆<sup>2,3</sup>, 李宇航<sup>2,3</sup>, 胡伟强<sup>2,3</sup>, 辛义国<sup>2,3\*</sup>

- (1. 黑龙江省火山岩科技有限公司, 哈尔滨 50001;  
2. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150086)

**摘要:**玄武岩纤维作为新兴高性能材料, 在建筑、航空航天等领域应用广泛, 但当前产业实践普遍将玄武岩视为均质工业品, 忽视了不同构造环境形成的地质多样性, 导致原料选择缺乏科学依据。本文构建了连接地质成因与工程应用的“源—汇”分析框架, 核心论点为: 玄武岩的成岩构造环境(源)通过其地球化学“指纹”, 主要控制了纤维材料的性能特征与应用场景(汇)。文章建立了基于构造环境的玄武岩地球化学分类体系(MORB、OIB、CFB、IAB), 并论证了在不同应用场景下, 如何依据“需求—性能—地球化学—选址”的逻辑链实现原料精准匹配。研究表明, 土木工程领域需要低碱的 MORB 型玄武岩以保障耐久性, 航空航天领域需要高硅铝、低碱的 CFB 型玄武岩以获得极致性能, 而农业修复领域则需要高镁钙的 OIB 型玄武岩以提高风化速率。该理论框架为玄武岩资源的精准勘探、科学评价与高附加值利用提供了新的科学路径。

**关键词:**玄武岩纤维; 地球化学; 源—汇控制论; 应用领域

**中图分类号:** TQ343.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2736(2025)08-0124-6

## 0 引言

玄武岩是一种由地幔部分熔融形成的岩浆经地表喷发或溢出后冷凝而成的基性火成岩<sup>[1]</sup>。我国玄武岩资源分布广泛, 从东北的火山群到西南的峨眉山大火成岩省, 其地质与地球化学特征多样, 是具有重要经济价值和战略意义的自然资源<sup>[2]</sup>。传统的玄武岩应用主要集中在建筑骨料、道路铺设等领域, 利用的是其坚硬、耐磨的物理特性<sup>[3]</sup>。

近年来, 以玄武岩为唯一原料制成的连续玄武岩纤维(CBF)<sup>[4]</sup>, 因其在某些性能指标上可与甚至超越 S-玻璃纤维相当的力学性能、优异的耐温性和化学稳定性, 以及天然环保、成本可控的优势, 成为与碳纤维、芳纶并列的我国重点发展的四大高性能纤维之一<sup>[5]</sup>。然而, 高端应用

需求与粗放式原料选择之间的矛盾日益突出。产业实践中, 并非所有玄武岩都适合拉制高性能纤维, 但对原料的评价往往停留在简单的化学成分列表, 缺乏对其地质成因的深入分析<sup>[6]</sup>。这种“源头”(地质成因)与“终端”(材料应用)的研究脱节, 是当前玄武岩材料领域的关键知识缺口, 明显限制了这一战略资源的潜力挖掘与高附加值利用<sup>[7]</sup>。

为解决此问题, 本文旨在从地球系统科学的视角, 构建并论证一个“源—汇”控制模型, 打通从地幔动力学到市场应用的完整逻辑链, 为玄武岩资源的适材适用和精准开发提供科学指导。

## 1 玄武岩的地质成因与地球化学“指纹”

玄武岩并非成分均一的工业原料, 而是一类岩石的总称, 其化学与矿物组成的显著差异, 根

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230477)。

表 1 不同构造环境玄武岩的地球化学指纹与材料性能潜力

玄武岩类型	构造环境与成因	主要化学特征	详细化学成分	材料性能优势	性能限制与注意事项
洋中脊玄武岩 (MORB)	大洋扩张中心 下方亏损地幔 减压熔融	低钾 $K_2O$ 、低钛 $TiO_2$ 、成分均一 稳定	$SiO_2$ 48 - 52%、 $Al_2O_3$ 14 - 16%、 总碱量 < 5%	天然低碱特性,高耐久 性纤维首选,耐碱纤维 优质原料	成分相对单一,特殊性能改进空间有限
洋岛玄武岩 (OIB)	地幔深部富集, 地幔柱(热点) 上涌	化学成分变化 大,富集不相容 元素,钾、钠、铁 含量高	$Na_2O+K_2O$ 可达 8%,高铁镁含 量,成分波动 较大	高铁镁有利耐热,特殊 功能性潜力	高碱严重损害稳定性,不宜直接用作高性能纤维,需要改性处理
大陆溢流玄武岩 (CFB)	地幔柱与大陆 岩石圈相互作用 产物,成因机制 复杂	成分变化剧烈, 地壳污染影响, 高钛/低钛分化	$SiO_2$ 含量偏高, 高钛和低钛亚 类,成分跨度 最大	最大高性能纤维原料 库,高 $SiO_2 + Al_2O_3$ 组 合,高 $FeO + MgO$ 理想 组分	需要精细甄别,品质差异较大,选择性开发重要
岛弧活动大陆边缘玄武岩 (IAB)	俯冲带环境,俯 冲板片脱水,最 大离子亲石元 素富集	Nb-Ta 负异常, 高铝特征显著, 富集大离子 元素	$Al_2O_3$ 16-20%, K 含量较高,Nb -Ta 亏损	高铝提升力学性能,优 异耐热特性,结构稳定 性好	普遍富集碱金属,化学稳定性受损,需要脱碱处理

植于其形成的大地构造环境,构造环境决定了玄武岩的基本地球化学特征,这是预测其材料性能的重要基础。依据构造背景,可将纤维用玄武岩原料划分为四个主要类型<sup>[8]</sup>(表 1)。

## 2 玄武岩纤维国内外发展现状

玄武岩纤维的研发始于 20 世纪,前苏联在 60 年代率先实现了规模化研究和应用,并成功用于“联盟-19”号宇宙飞船,苏联解体后,俄罗斯和乌克兰继承并发展了相关技术,成为目前国际市场的主要生产国。目前全球玄武岩纤维年产量约 3-4 万吨,其中国外产量不足 1 万吨<sup>[9]</sup>。

我国玄武岩纤维产业起步于 20 世纪 70 年代,自 21 世纪初以来发展迅速。其标志性事件包括:2002 年,玄武岩纤维被列入国家“863 计划”;2019 年,《玄武岩纤维分类分级及代号》(GB/T38111-2019)国家标准发布,为行业提供了指导;2020 年,世界首条 2400 孔漏板拉丝智能化池窑生产线在四川广安投产,标志着我国在连续玄武岩纤维制造技术上达到世界领先水平;2023 年,我国玄武岩纤维产量已达 3.11 万吨,

市场规模约 3.5 亿元<sup>[10]</sup>。

作为我国重点发展的四大高性能纤维之一,玄武岩纤维在性能谱系中占据了独特的生态位。与碳纤维相比,玄武岩纤维虽然在极致的弹性模量(碳纤维为 230-600GPa)上有所不及,但其抗拉强度(3000-4800MPa)与普通碳纤维处于同一量级,且密度更高,生产成本则显著降低<sup>[11]</sup>。与芳纶纤维相比,玄武岩纤维的模量更高,且完全无机,具有优异的绝缘性和环保特性。相较于 E-玻璃纤维,其抗拉强度和弹性模量均高出一个等级;而相较于更高端的 S-玻璃纤维,玄武岩纤维在抗拉强度上与之相当,在弹性模量上甚至更优,同时还具备更宽的使用温度范围和更强的化学稳定性,而生产成本却更低。

## 3 “源—汇”框架下的综合应用

基于上述理论框架,将“源—汇”理论应用于实践,核心是依据特定应用场景(汇)的性能需求,反向追溯并选择具有特定地球化学特征(源)的玄武岩原料(图 1)。

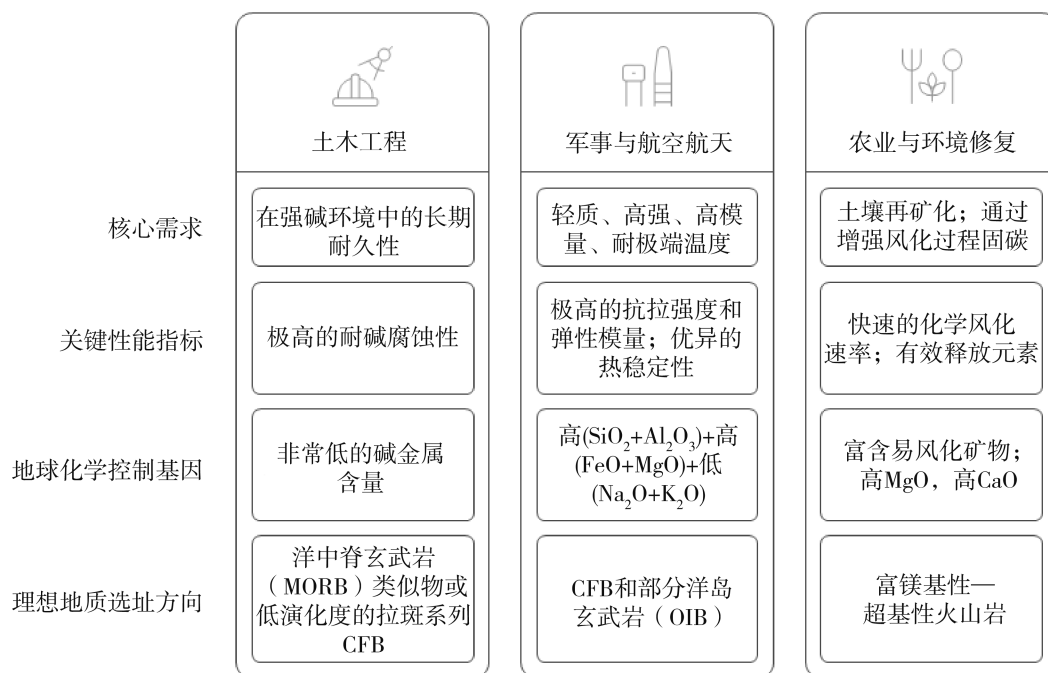


图 1 从应用需求到地质选址的“源—汇”匹配示意图

### 3.1 建筑及土木工程领域：对耐久性的极致追求

在建筑及土木工程领域，玄武岩纤维作为增强材料，其应用已相当广泛，占据了超过 70% 的市场份额。研究表明，掺入玄武岩纤维可使混凝土抗压强度提高 10-30%，抗拉强度提高 27%，其加固效果远超传统聚合物纤维<sup>[12]</sup>。然而，该领域最核心的需求并非极限强度，而是在混凝土等强碱环境(pH>12)中的长期耐久性。

这一核心需求在“源—汇”理论框架下，直接指向了原料的化学稳定性。纤维的耐碱性由其抵抗化学侵蚀的能力决定，而其耐碱性的关键控制因素是碱金属含量。碱金属离子作为网络变性剂，破坏了玻璃结构中稳固的 Si-O-Si 桥键，形成化学性质不稳定的非桥氧键，这些位点极易受到 OH<sup>-</sup> 离子的攻击，导致玻璃网络迅速解体。这一地球化学要求直接指向了特定的地质源头：源于亏损地幔、天然贫碱的洋中脊玄武岩(MORB)及其类似物，例如蛇绿岩套中保存的古洋壳或某些演化程度低的拉斑系列大陆溢流玄武岩(CFB)，是该应用领域最理想的原料产地<sup>[13]</sup>。

### 3.2 国防军工与航空航天领域：对综合性能的极限挑战

在国防军工与航空航天领域，材料面临的是最严苛的考验，其核心需求是轻质、高强、高模量与耐极端温度的完美结合。从防弹装甲到火箭发动机喷管，再到嫦娥六号在月背展开的玄武岩纤维国旗，都要求材料在承受极端机械应力与温度骤变的同时保持结构完整<sup>[1]</sup>。

要满足如此极致的综合性能需求，必须从“源—汇”论的地球化学层面进行解析。该理论指出，这需要多种地球化学组分的优化组合：(1) 高含量的网络形成剂(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，用以构建强韧的玻璃网络骨架，这是高强度和高模量的基础；(2) 适当含量的热稳定性贡献者(FeO+MgO)，它们能在高温下诱导纤维表面析出纳米晶保护壳，从而提高使用温度上限；(3) 极低含量的网络变性剂(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)，以保障在极端温差或辐射环境下内部结构的完整性。能够同时满足这些复杂地球化学要求的地质体并不常见，它们最可能出现在成因复杂的大陆溢流玄武岩(CFB)和部分洋岛玄武岩(OIB)中。这些岩浆系统经历了复杂的演化过程(如地壳混染、分离

结晶),可能孕育出兼具高硅铝和高铁镁的理想组分,是寻找顶级性能纤维原料的重要目标<sup>[14]</sup>。

### 3.3 农业与环境修复领域:对化学风化速率的精准调控

近年来,利用岩石粉末进行土壤再矿化和增强风化固碳(ERW)成为环境地球科学的前沿。在此应用中,玄武岩的核心价值在于其化学风化速率以及释放矿质营养元素的能力。理想的材料应能快速风化,为土壤补充Ca、Mg、K等元素,同时消耗大气CO<sub>2</sub>形成稳定的碳酸盐<sup>[15]</sup>。

对于这一新兴应用,“源—汇”理论提供了独特的解析视角:其核心价值—化学风化速率,主要由岩石的矿物组成决定。富含橄榄石、辉石等在表生环境下化学性质不稳定的矿物,其风化速率远高于富含长石和石英的岩石,这些矿物在化学成分上表现为高MgO和高CaO<sup>[16]</sup>。因此,该应用领域需要寻找的并非传统意义上的“稳定”材料,而是具有适当“不稳定性”的材料。理想的地质源头是那些富镁的基性—超基性火山岩,例如部分源于地幔柱热点的洋岛玄武岩(OIB)或大陆溢流玄武岩(CFB)中的苦橄岩质单元。通过选择这类玄武岩,可以高效地实现元素释放和CO<sub>2</sub>封存,将亿万年前火山产物转化为应对当代气候与粮食安全挑战的有效工具<sup>[17]</sup>。

## 4 挑战与未来发展方向

### 4.1 产业发展挑战

当前玄武岩纤维产业仍面临现实挑战。首先是技术瓶颈,在拉丝漏板、浸润剂、均化技术、复配技术和熔制技术等关键环节仍有待突破<sup>[18]</sup>。其次是生产成本较高,复杂的工艺和高能耗限制了其与玻璃纤维等材料的市场竞争,市场认知度不足和现有成熟材料的市场壁垒也阻碍了其大规模推广<sup>[19]</sup>。

### 4.2 前沿科学与发展方向

为应对上述挑战,必须将产业问题转化为科学问题,从源头寻求突破。建立勘探评价新标

准:当前最大的科学挑战是,缺乏一套基于地球化学成因的、标准化的纤维用玄武岩勘探与评价体系。未来应发展地球物理—地球化学耦合勘探技术,快速圈定具有特定地球化学品位(如低碱区、高铁镁区)的优质靶区。

构建全流程预测模型:理论上,应致力于构建一个从“地幔部分熔融→岩浆演化→工业熔融→拉丝成纤”的全流程数值模型。该模型一旦建立,将能通过输入岩石化学成分,预测其纤维性能,实现材料的“定制化设计”。

拓展地外资源新领域:将“源—汇”模型拓展至月球、火星等富含玄武岩的地外天体。通过分析月壤、火星岩石的地球化学数据,可评估其作为未来地外建筑材料的原位资源潜力,为人类深空探索提供材料学判据。

## 5 结语

玄武岩及其纤维的综合利用,正处在从经验摸索走向科学引领的关键转折点。本文构建的“源—汇”控制论,系统揭示了玄武岩材料性能的内在控制因素:其形成的地质源头通过地球化学“指纹”,主要决定了其最终的工程性能。这一从“就岩论岩”到“因源识材”的范式转变,不仅深刻回答了“哪种玄武岩是好原料”的产业难题,更为这一战略资源的精准勘探、科学评价和高附加值利用提供了清晰的路线图。将每一根玄武岩纤维的性能追溯到其诞生时所在的板块构造环境,是实现其最高价值利用的重要途径,对推动我国新材料产业和资源科学的高质量发展具有重要理论与实践意义。

### 参考文献(References):

- [1] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 73: 166–180.
- [2] 崔晓歌. 琼北晚新生代火山岩岩石地球化学特征、岩浆源区组成及其地球动力学意义[D]. 中国地震局地质研究所, 2023.
- [3] 刘嘉麒. 发展玄武岩新材料 提升新质生产力[J].

- 中国科技产业, 2024, 38(08): 4-7.
- [4] ORDUNA L, RAZQUIN I, OTAEGI I, et al. Ionic Liquid-Cured Epoxy/PCL Blends with Improved Toughness and Adhesive Properties[J]. *Polymers*, 2022, 14(13): 2679.
- [5] 徐小明, 何曼如, 张旭平, 等. 纤维用玄武岩矿特性对其可纺性及纤维性能的影响研究[J]. *合成纤维工业*, 2021, 44(04): 24-31.
- [6] LIU H, YU Y, LIU Y, et al. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids [J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2376.
- [7] WEI B, CAO H, SONG S. Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(01): 22-29.
- [8] JOHANNESSON B, SIGFUSSON T I, FRANZSON H. Suitability of Icelandic basalt for production of continuous fibres [J]. *Applied Earth Science*, 2019, 128(03): 73-78.
- [9] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 74: 74-94.
- [10] 郭欢, 麻岩, 陈姝娜. 连续玄武岩纤维的发展及应用前景[J]. *中国纤检*, 2010, 30(05): 76-79.
- [11] LIU H, YU Y, LIU Y, et al. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids[J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2376.
- [12] SCALICI T, PITARRESI G, BADAGLIACCO D, et al. Mechanical properties of basalt fiber reinforced composites manufactured with different vacuum assisted impregnation techniques [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 104: 35-43.
- [13] 李珺, 徐冠立, 刘荣, 等. 玄武岩纤维原料特征的统计及分析研究[J]. *地质论评*, 2024, 70(01): 262-276.
- [14] 王恩清, 赵书林. 玄武岩连续纤维及其复合材料[J]. *天津纺织科技*, 2007, 28(03): 21-25.
- [15] BEERLING D J, KANTZAS E P, LOMAS M R, et al. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands [J]. *Nature*, 2020, 583(7815): 242-248.
- [16] HARTMANN J, KEMPE S. What is the maximum potential for CO<sub>2</sub> sequestration by “stimulated” weathering on the global scale? [J]. *Die Naturwissenschaften*, 2008, 95(12): 1159-1164.
- [17] HARTMANN J, WEST A J, RENFORTH P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(02): 113-149.
- [18] 王子焱, 钟昊天, 贾钰, 等. 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*, 2020, 40(03): 161-178.
- [19] LIU H, YU Y, LIU Y, et al. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids[J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2376.

---

#### 作者简介:

第一作者: 牛柏然, 1991 年生, 女, 哈尔滨人, 黑龙江省火山岩科技有限公司, 主要研究方向为陶瓷艺术设计。Email: 740555667@qq.com;

通讯作者: 辛义国, 1991 年生, 男, 哈尔滨人, 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 助理工程师, 主要研究方向为矿产资源勘查。Email: 123982315@qq.com

---

## On the Controlling Theory of Source–Application of Basalt Fibers

NIU Boran<sup>1</sup>, YAO Yu<sup>2,3</sup>, HAO Xiaoqing<sup>2,3</sup>, LI Yuhang<sup>2,3</sup>, HU Weiqiang<sup>2,3</sup>, XIN Yiguo<sup>2,3\*</sup>

(1. Heilongjiang Volcanic Rock Technology Co., Ltd, Harbin 150001, China;

2. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin,  
Ministry of Natural Resources Harbin 150086, China)

**Abstract:** Basalt fibers, as emerging high – performance materials, have been widely applied in construction, aerospace, and other fields. However, treat basalt is generally considered as homogeneous industrial raw materials for the current industrial practices, ignoring the geological diversity formed by different tectonic environments, which results in unscientific material selection. This paper establishes a “source–application” analytical framework connecting geological genesis with engineering applications. The core thesis is that the petrogenetic tectonic environment (source) primarily controls the performance characteristics and application scenarios (application) of fiber materials through geochemical fingerprints. A geochemical classification system, including iMORB, OIB, CFB, IAB, is established based on tectonic environments, which demonstrates how to achieve precise material matching through the “demand – performance–geochemistry–site selection” logic chain in different application scenarios. The study shows that the civil engineering requires low–alkali MORB–type basalt for durability, aerospace applications need high–silica–aluminum, low–alkali CFB–type basalt for extreme performance, while agricultural restoration requires high–magnesium – calcium OIB – type basalt for enhanced weathering rates. This theoretical framework provides a new scientific pathway for precise exploration, scientific evaluation, and high–value utilization of basalt resources.

**Key words:** basalt fiber; geochemistry; source–applicant theory; application fields