

# 玄武岩纤维复合材料应用研究进展

臧德厚<sup>1</sup> 潘黎光<sup>2</sup>

1 山东中烟工业公司颐中（烟草）集团有限公司，山东青岛，266000；

2 青岛颐中资产运营有限公司，山东青岛，266000；

**摘要：**玄武岩纤维是一种以天然玄武岩矿石为原料，经高温熔融拉丝制得的新型无机纤维，具有优异的力学性能、耐高温性、耐腐蚀性和环保性。其生产过程不添加任何化学成分，能耗低、无污染，符合绿色制造理念。本文系统介绍了玄武岩纤维的制备工艺，包括矿石预处理、高温熔融拉丝和表面处理等关键环节，深入分析了其力学、热学、电磁、耐腐蚀和隔音性能。介绍了玄武岩纤维复合材料在建筑加固、土木工程、汽车轻量化、轨道交通和电磁屏蔽等领域的应用潜力，并给出了产业未来发展建议。

**关键词：**玄武岩纤维；复合材料；力学性能；绿色材料；应用领域

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.05.044

## 引言

玄武岩纤维因其原料来源广泛、制备过程环保、综合性能优异，被视为 21 世纪最具潜力的高性能纤维之一<sup>[1]</sup>。与玻璃纤维和碳纤维相比，玄武岩纤维在耐高温性（-260~820℃）、抗化学腐蚀性及电绝缘性方面表现突出，同时成本仅为碳纤维的 1/10。近年来，随着全球对可持续材料需求的增长，玄武岩纤维在建筑加固、汽车轻量化、海洋工程等领域的应用迅速扩展。玄武岩纤维作为一种新型无机纤维，以天然玄武岩矿石为原料，具有优异的力学性能、耐高温性及环境友好特性。

本文综述了玄武岩纤维的制备工艺、性能优势及其在建筑、交通、电子等领域的应用现状<sup>[2]</sup>。玄武岩纤维可替代碳纤维或玻璃纤维，降低成本的同时提升材料性能。尽管我国玄武岩纤维产业已取得进展，但在拉丝漏板孔数等关键技术指标上仍落后于国际先进水平。未来需进一步优化生产工艺，拓展其在航空航天、新能源汽车等高端领域的应用。

## 1 玄武岩纤维的制备工艺

玄武岩纤维的制备工艺主要包括三个关键步骤<sup>[3]</sup>：矿石破碎与预处理、高温熔融拉丝以及纤维表面处理。

### 1.1 原料准备与矿石破碎

玄武岩纤维的制备原料为天然玄武岩矿石。在制备前，首先需对玄武岩矿石进行破碎处理，将其破碎至粒径为 3~5cm 的碎石颗粒，以满足后续熔融工序对原料粒度的要求。采用高于 8000 高斯的高强磁场进行磁选处理，有效剔除 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等金属氧化物，确保矿石

成分的纯净与均匀。

### 1.2 高温熔融与拉丝成型

熔融拉丝是玄武岩纤维制备过程中最为关键的工艺环节，其本质是在高温条件下将玄武岩矿石熔融成玻璃态液体，再通过特定的漏板进行细丝的牵引与成型。在熔融炉底部设有漏板，漏板材质需具有良好的耐高温性和抗腐蚀性能，拉丝过程中，熔体通过漏板孔在重力或机械牵引作用下拉出，形成连续的玄武岩细丝。

### 1.3 纤维表面处理与浸润

初步拉丝得到的玄武岩原丝需经过表面处理工艺，以提升其与树脂基体或其他材料的界面结合力，并赋予其后续加工所需的柔韧性与耐磨性。该处理通常包括偶联剂涂覆与浸润剂处理两个步骤。

在偶联剂处理阶段，常采用硅烷类偶联剂，其浓度控制在 0.5%~1.2% 之间。这类偶联剂能够在纤维表面形成一层稳定的化学桥梁结构，显著增强纤维与有机基体之间的粘结性能，减少界面缺陷的产生，从而提升复合材料的整体力学性能。

随后进行浸润处理，通常采用环氧树脂基体系作为浸润剂，固含量为 6%~8%。浸润后的纤维需在 120~150℃ 的温度下进行烘干，以去除水分和挥发性溶剂，使浸润剂牢固地附着于纤维表面。

## 2 玄武岩纤维物理性能

### 2.1 力学性能

玄武岩纤维具有卓越的力学性能<sup>[4]</sup>，是其最核心、

也是应用最广泛的优势之一。

### 2.1.1 基本力学指标

连续玄武岩纤维的密度约为  $2.63 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ , 远低于金属材料, 却具备非常高的强度。其拉伸强度可达  $3000 \sim 4800 \text{ MPa}$ , 弹性模量在  $91 \sim 110 \text{ GPa}$  之间, 断裂伸长率约为 3.2%。相较于常用的 E-玻璃纤维, 其拉伸强度高出 40%~50%, 接近高端 S-玻璃纤维的水平。

### 2.1.2 高温稳定性

玄武岩纤维在高温条件下仍能保持相当比例的强度<sup>[5]</sup>, 是其区别于一般玻璃纤维的重要特点。在  $400^\circ\text{C}$  热处理后, 其拉伸强度仍可保持 50% 以上; 当温度升高至  $700^\circ\text{C}$  时, 其强度保持率仍有约 20%。

### 2.1.3 动态力学表现

在高应变速率条件下, 玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料表现出显著的动态响应能力。研究显示, 其弹性模量、拉伸强度和断裂应变等指标可随着应变速率的提高而增强, 其中拉伸性能提升幅度在 20%~60% 之间。

### 2.1.4 抗冲击与防护能力

玄武岩纤维复合材料在抗弹方面的性能相当于 S-玻璃纤维, 具备良好的冲击韧性和吸能能力。考虑到其价格低廉、耐高温、耐磨性强等综合特性, 在成本敏感型防护产品设计中有很大优势。通过与碳纤维、芳纶等高价纤维混杂使用, 可设计出性能更优、价格更合理的复合结构。

## 2.2 耐腐蚀性

玄武岩纤维以其优异的耐化学腐蚀性著称<sup>[6]</sup>, 尤其适用于潮湿、酸碱及盐雾等恶劣环境。

在酸性和碱性溶液中煮沸 3 小时<sup>[7]</sup>, 玄武岩纤维的质量损失极低, 尤其在盐酸中仅损失 2.2 g, 而玻璃纤维则高达 38.9 g。在强碱中, 玄武岩纤维的强度保持率在 69.5%~82.4% 之间; 在强酸中保持率甚至高达 83.8%~86.5%。这些数据充分说明其在恶劣化学环境中的长期使用可靠性。

## 2.3 热学与保温性能

玄武岩纤维的热学稳定性及保温性能使其成为理想的热防护材料。在  $400^\circ\text{C}$  条件下, 其断裂强度仍保持 85%;  $600^\circ\text{C}$  下仍能保持 80% 的原始强度。与矿棉等传统材料相比, 其在同等温度下强度保持率更高 (矿棉约为 50%~60%)。此外, 经  $780 \sim 820^\circ\text{C}$  预处理后, 其在  $860^\circ\text{C}$  仍能稳定工作而无明显收缩, 体现出其极高的热稳定性。

玄武岩纤维不仅耐高温, 还能在极低温条件下使用。例如, 可用作液氮 ( $-196^\circ\text{C}$ ) 容器的绝热层, 是极端温

差环境下的理想材料。而 E-玻璃纤维在  $-60^\circ\text{C}$  以下即性能不稳。

## 2.4 电磁性能

玄武岩纤维的电绝缘能力强, 电磁屏蔽性能优异<sup>[8]</sup>。玄武岩纤维具有很低的介电常数及优异的绝缘性能。其材料组成与电性能直接相关, 不同矿石成分可调控其介电强度, 适应不同电气绝缘需求。

## 2.5 隔音降噪性

玄武岩纤维的吸音能力强, 是优质的建筑声学材料<sup>[9]</sup>。与 E-玻璃纤维相比, 其吸音系数更高, 且随频率提升吸音性能逐步增强。适合制成毡类、板类吸音材料, 应用于高声环境下的噪声控制。广泛应用于电影院、音乐厅、大会堂等公共场所, 也可用于交通工具、航空设备等需要降噪的系统中, 提升舒适性与安全性。

## 3 玄武岩纤维复合材料的应用

### 3.1 建筑工程领域<sup>[10]</sup>

(1) 混凝土结构增强: 可采用玄武岩纤维增强复合材料 (BFRP) 筋替代钢筋, 如应用于沿海桥梁、地下工程、化工厂房等腐蚀环境, 其抗拉强度是钢筋的 2 倍, 重量仅为 1/4, 俄罗斯某跨海大桥采用 BFRP 筋, 预计寿命提升至 80 年。

(2) 结构加固与修复: 玄武岩纤维布 (BFRP 布) 粘贴于梁、柱表面, 抗弯强度提升 20%~30%, 成本降低 40%。

(3) 土工格栅/土工布: 用于软土地基加固 (如青藏铁路路基); 耐酸碱性能优于聚酯纤维, 寿命可达 50 年。

(4) 防火与隔热: 玄武岩纤维织物耐高温  $820^\circ\text{C}$ , 用于钢结构防火包覆, 如上海某体育馆穹顶采用 BF 增强硅橡胶涂层, 耐火极限达 3 小时。另外, 可作为隔热板材, 密度仅为传统岩棉的 1/2, 导热系数  $\leq 0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(5) 新型建筑围护结构<sup>[12]</sup>: 轻质墙板: 玄武岩纤维增强水泥板 (BFRC) 重量减轻 30%, 适用于装配式建筑; 作为透光复合材料, 与树脂复合制成半透明幕墙, 兼具采光与高强度。

### 3.2 交通运输领域

#### 3.2.1 汽车工业应用<sup>[13]</sup>

(1) 轻量化车身结构: 德国 EDAG 公司开发的 Light Car 概念车采用玄武岩纤维复合材料车身, 较传统玻

玻璃纤维减重 30%，整车质量降低至 800kg 以下；西班牙 Hispano Suiza 公司推出的全碳纤维-玄武岩纤维混合车身跑车，抗扭刚度提升 40%。

(2) 底盘与悬挂系统：某商用车采用玄武岩纤维环氧树脂板簧替代钢制板簧，实现减重 60%（由 23kg 降至 9kg），疲劳寿命提升至 50 万次循环（钢制标准为 20 万次）；宝马 i3 电动车试用玄武岩纤维增强 PA6 副车架，实现减重 35%，碰撞吸能提升 25%。

### 3.2.2 轨道交通领域<sup>[14]</sup>

(1) 俄罗斯 RZD 高铁：采用玄武岩纤维-酚醛树脂夹层板，防火性能满足 EN45545-2 HL3 级，隔音效果提升 15dB（500Hz 频段）。

(2) 制动系统：采用玄武岩纤维含量 30%的复合闸片，摩擦系数稳定性（ $\mu=0.35\pm0.05$ ），磨损率降低至铸铁闸片的 20%。

### 3.2.3 航空航天工程<sup>[15]</sup>

(1) 次承力结构：机翼蒙皮采用 $[0^\circ/90^\circ]$ 玄武岩纤维织物。

(2) 内饰防火：如客机舱壁板采用玄武岩纤维-聚酰亚胺复合材料，热释放速率 $<65\text{kW/m}^2$ （FAR25.853 标准），烟密度 $<15$ （NBS 烟箱法）。

### 3.2.4 船舶制造领域<sup>[16]</sup>

(1) 船体结构：10 米级帆船采用真空灌注成型工艺，层间剪切强度提升至 45MPa，海水浸泡 180 天后强度保留率 $>95\%$ 。

(2) 特殊部件：声呐导流罩，声波衰减 $<0.5\text{dB/cm}$ （100kHz），耐静水压可达 3MPa（300 米工作深度）。

## 4 结论

玄武岩纤维凭借其卓越的物理性能、绿色环保的制备工艺以及广泛的资源基础，已成为复合材料领域中最具发展潜力的新型纤维材料之一。其在高强度、耐高温、耐腐蚀、隔热绝缘等方面的综合优势，尤其适合替代传统玻璃纤维或部分碳纤维应用，显著提升材料性能并降低制造成本。当前，玄武岩纤维在建筑加固、汽车轻量化、轨道交通、电子电气及防护工程等方面已实现初步产业化，并显示出良好的应用前景。然而，我国在玄武岩纤维的高端装备制造与制备技术方面仍存在与国际先进水平的差距。未来，需从原料优化、制备工艺提升、界面改性技术突破等方面持续攻关，推动玄武岩纤维实现从“工程替代”向“性能引领”的跨越，加快其在航空航天、新能源、高端防护等战略性领域的规模化应用，

助力实现材料强国与绿色制造的双重目标。

## 参考文献

- [1] 陈松, 贾攀, 梁凤, 等. 连续玄武岩纤维生产工艺及技术瓶颈浅析[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(7):28-32.
- [2] 宋平, 高欢, 汪灵, 等. 玄武岩纤维基本特征及应用前景分析[J]. 矿产保护与利用, 2022(4):173-178.
- [3] 陈明凤, 陈廷. 玄武岩纤维品质影响因素及应用分析[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(2):7-12.
- [4] 张玮, 谭艳君, 刘姝瑞, 等. 玄武岩纤维的性能及应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2022(1):85-89.
- [5] 王淼, 沈艳琴, 武海良. 玄武岩纤维的发展现状及趋势[J]. 纺织导报, 2021(5):50-53.
- [6] 叶权明. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青混合料路用性能及应用研究[D]. 重庆, 重庆交通大学, 2022.
- [7] 明志宏, 胡红. 连续玄武岩纤维衬垫织物复合材料及其拉伸性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2009, 35(6):660-664.
- [8] 刘学慧. 连续玄武岩纤维与碳纤维/芳纶/玻璃纤维的对比及其特性概述[J]. 山西科技, 2014, 29(01):87-90.
- [9] 李祖湛. 玄武岩纤维复合材料层合板静、动态力学响应研究[D]. 西南科技大学, 2017.
- [10] 于利超. 玄武岩纤维表面处理对其复合材料力学性能的影响[D]. 东华大学, 2015.
- [11] 崔毅华. 玄武岩连续纤维的基本特性. 纺织学报, 2005, (05):120-121.
- [12] 黄故. 现代纺织复合材料. 北京: 中国纺织出版社出版, 2000.
- [13] 陈利. 三维纺织技术在航空航天领域的应用. 航空制造技术, 2008(4):47-49.
- [14] 杨超群, 王俊勃, 李宗迎, 等. 三维编织技术发展现状及展望. 棉纺织技术, 2014, 42(7):1-5.
- [15] 杨光. 舒适性净化空调用复合过滤材料的研发与性能研究[D]. 石家庄, 河北科技大学, 2016.
- [16] 袁玉华. 碳纤维纬编针织复合材料的制备与性能[D]. 石家庄, 河北科技大学, 2016.

作者简介：臧德厚（1972.08-），男，汉族，山东兖州人，工程师，本科，主要从事技术改造、基础建设、设备管理、能源管理、资产运营等工作。