

Geological Characteristics and Metallogenic Model of Gold Deposits in the Wandashan Metallogenic Belt, Heilongjiang Province

SUN Gang, YANG Yunbao, ZHAO Shimeng^{*}, XU Guowei, GUO Fenglei, LIU Wanhui

(Heilongjiang First Geological Exploration Institute, Mudanjiang 157011, China)

Abstract: To systematically sort out the geological characteristics, metallogenic mechanism, deposit type and prospecting direction of gold deposits in Wandashan metallogenic belt, the temporal and spatial distribution of gold mineralization in Wandashan metallogenic belt is summarized and the corresponding metallogenic model is established by analyzing the regional geological background and the metallogenic geological body, metallogenic structure, mineralization process, material source, ore control mechanism and prospecting indicators of typical gold deposits. The results show that gold mineralization is mainly related to acidic magmatic rocks in the late Mesozoic. Ore – forming fluids upwelled and filled along the relatively weak areas of geological structure, such as volcanic structure, fracture surface of rock mass, contact interface and fracture zone, and hydrothermal mineralization alteration reactions, such as metasomatism and extraction occurred, thus forming a variety of deposit types, such as volcanic hydrothermal type, skarn type, hot spring type and quartz vein type. This understanding provides a theoretical basis for the work deployment of various mining areas and the delineation of regional gold and silver prospecting targets in the Wandashan metallogenic belt.

Key words: geological features; metallogenic model; gold mine; Wandashan metallogenic belt

玄武岩及其纤维的综合应用与发展研究

牛柏然¹, 齐宏运^{2,3*}, 贾立明^{2,3}, 孟玲禹^{2,3}, 王德财^{2,3}, 苗志风^{2,3}

(1. 黑龙江省火山岩科技有限公司, 哈尔滨 150001;

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:玄武岩是一种广泛分布的基性火成岩,具有坚硬、耐磨、抗腐蚀的特性,在建筑、道路建设、新型材料开发等领域具有重要应用价值,其产品玄武岩纤维更是凭借其高抗拉强度、耐高温和耐化学腐蚀等性能,成为材料科学领域的研究热点。本文综述了玄武岩的形成机理以及国内外玄武岩纤维的研究与应用现状,分析了其在建筑土木、道路工程、能源、国防军工(航空航天)和农业等不同领域的应用优势及面临的挑战,并探讨了未来发展方向,强调技术创新、应用拓展和可持续发展的重要性,旨在为玄武岩资源的高效利用和相关领域的进一步研究提供参考。

关键词:玄武岩;纤维;复合材料;综合利用;应用领域

中图分类号:F293.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)04-0065-8

0 引言

玄武岩(basalt)是一种广泛分布的基性火成岩,主要由地幔部分熔融形成的岩浆溢出地表裂隙或经火山喷发后凝结而成^[1]。在我国,玄武岩资源丰富且分布广泛,从东北的火山群^[2]到西南的峨眉地幔柱^[3],不同地区的玄武岩展现出多样的地质特征和地球化学性质。玄武岩因其坚硬、耐磨、抗腐蚀等特性,在建筑、道路、新材料开发、航空航天等领域应用前景广阔,同时其研究对理解地球深部过程、预测火山活动、探索天体地质历史具有重要意义,其在地质学、材料科学和可持续发展领域的交叉研究,正在不断推动相关学科的进步和创新。作为一种战略资源,在玄武质岩浆活动过程中,常伴生有钴(Co)^[3]、铜(Cu)^[5]等关系国民经济、国家安全和高科技发展的重要战略金属资源,也进一步提升了其经济价值和战略意义。

近年来,随着技术的不断进步,玄武岩纤维在多个领域的应用虽然取得了显著进展,然而,仍面临拉丝漏板、浸润剂、均化技术等技术瓶颈^[6]。本文旨在基于对玄武岩形成机理的描述,综述玄武岩纤维国内外研究利用现状,分析其不同领域的应用优势及存在的问题,并探讨未来的发展方向,以为玄武岩资源的高效利用和相关领域的进一步研究提供参考。

1 基本概述

1.1 玄武岩

玄武岩因富含辉石、橄榄石等深色矿物通常为黑色或深灰色,其结构常见气孔状、杏仁状或斑状,且可能含大矿物晶体,平均密度为2.8~3.3g/cm³。未风化的玄武岩质地致密,颜色多样,包括黑色、灰色、黑褐色、暗紫色和灰绿色;风化后,可形成六方柱状节理,进一步风化则变为玄武土,甚至在雨水淋滤作用下转化为铝土

基金项目:中国地质调查局项目(DD20230504)。

矿^[1]。玄武岩的主要成分包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe_xO_y、CaO、MgO,以及少量的 K₂O 和 Na₂O,其中 SiO₂ 含量最高,约占 45% ~ 50%^[6]。然而,由于成分、结构、矿物组成和冷凝速度的差异,玄武岩会形成不同的种类^[8](表 1)。

1.2 玄武岩喷发方式与形成机制

玄武岩的喷发方式主要分为裂隙式和中心式两种。裂隙式喷发通常形成大面积的泛流玄武岩,如峨眉山大火成岩省(ELIP)^[3],即峨眉地幔柱玄武岩,属拉斑玄武岩类,是二叠纪中晚期在中国西南广泛发育的巨型厚层状基性火山岩,面积超过 2.5 × 10⁵ km²,富含 SiO₂。这种喷发方式的通道多为与玄武岩成分相似的岩墙群,但常

被后续岩流掩埋,相比之下,中心式喷发则形成玄武岩火山锥及其周边的熔岩流和火山碎屑岩,常见于中国东部的碱性玄武岩区域,如东南沿海及闽中、闽西等地,喷发于新生代^[9]。玄武岩的形成机制复杂多样,主要与地幔部分熔融、下地壳熔融、岩浆分异结晶、同化与岩浆混合以及地幔异质性有关(图 1),为研究火山活动、地壳演化和天体地质提供了重要依据。

不同玄武岩因形成机制的差异而具有各异的性能,这为其纤维产品在多领域的广泛应用奠定了基础。然而,研究表明,并非所有玄武岩都适合用于纤维生产,仅有特定成分和结构的玄武岩能够满足拉丝工艺的要求^[10]。

表 1 玄武岩部分类型

类型	主要矿物成分	结构与构造	成因
安山玄武岩	辉石、斜长石、橄榄石、角闪石、黑云母、石英、磁铁矿	隐晶质、间粒、交织、杏仁状	深成基性岩浆喷出,混合中性岩浆物质,或成岩中后期有中酸性物质侵入,在成岩后含有中碱性矿物,形成不同的矿物构造。
熔渣状玄武岩	基性长石、辉石、橄榄石、角闪石、黑云母	隐晶质、块状、气孔状构造	基性岩浆地表流动冷却,形成硬皮壳,反复过程形成岩浆包卷,终冷却成岩。
橄榄玄武岩	斜长石、辉石、橄榄石、伊丁石化	间粒、斑状、块状、微小气孔、杏仁状构造	基性岩浆喷出地壳形成绳索状。
火山熔岩	斜长石、辉石、火山玻璃成分	绳索状构造	玄武质岩浆喷出后流动,表面冷却凝结速度快于内部,形成绳索状构造。
杏仁状玄武岩	斜长石、辉石、火山玻璃	显微间隐、斑状、杏仁状构造	岩浆在冷却过程中气体逸出并被矿物质填充。
气孔状玄武岩	辉石、橄榄石、基性长石、磁铁矿、角闪石	斑状,气孔发育,密度小	玄武质岩浆喷发,含易气化挥发矿物成分,快速气化挥发形成气孔结构。

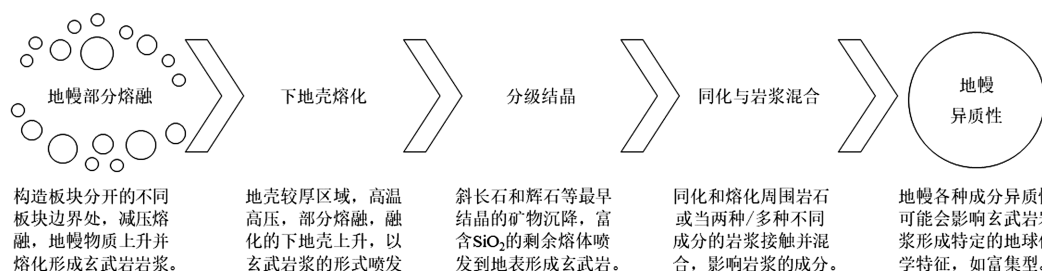


图 1 玄武岩形成中涉及的一些关键岩石成因过程

表2 玄武岩纤维与其他纤维主要性能比较^[10]

纤维类型	密度 ($g \cdot cm^3$)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	延伸率 /%	绝缘	是否生产	性能环保 成本
玄武岩纤维	2.63	3000 ~ 4800	93.1	3.1	是	是	低
碳纤维	1.78	3500 ~ 6000	230 ~ 600	1.5 ~ 2.0	否	否	高
芳纶纤维	1.45	2900 ~ 3400	70 ~ 140	2.4	是	否	高
S-玻璃纤维	2.54 ~ 2.57	4020 ~ 4650	83 ~ 86	5.3	是	否	低
E-玻璃纤维	2.54	3100 ~ 3800	72.5 ~ 75.5	4.7	是	否	低

1.3 玄武岩纤维

连续玄武岩纤维(Continuous Basalt Fiber, 简称CBF)是以纯天然玄武岩矿石为唯一原料,经1500℃左右高温熔融,再通过铂铑合金拉丝漏板技术(1320℃~1450℃)下快速拉丝制成的非晶态无机纤维,具有出色的耐温性、化学稳定性、抗老化性、辐射防护性和隔热隔音性,且吸湿率低、抗拉强度和弹性模量高,是我国重点发展的四大高性能纤维之一(与碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维并列)^[10](表2)。

2 玄武岩纤维国内外发展现状

2.1 玄武岩纤维国外发展现状

玄武岩纤维制备技术起源于19世纪英国,1923年法国人Paul Dhé申请“拉丝”专利,但规模化研发和工业化生产始于前苏联,其于20世纪60年代开发出优异性能的纤维混凝土,并于1975年首次应用于“联盟-19”号宇宙飞船。苏联解体后,俄罗斯在玄武岩纤维技术改进和市场应用方面取得显著进展,但美国欧文斯科宁(Owens Corning)公司却将重心转移至性能更优的S-2玻纤^[6]。近年来,玄武岩纤维因成本低、环保性强,逐渐替代玻璃纤维,且在3D打印领域展现出巨大潜力,在材料科学中越来越受欢迎^[12]。3D打印中的熔融沉积建模(FDM)技术可实现玄武岩纤维增强复合材料的快速成型,优化打印参数对提升材料力学性能和降低成本至关重要。然而,目前关于3D打印参数对环保连续玄武岩纤维增强可生物降解PLA复合材料影

响的研究仍较为有限^[13]。目前,全球玄武岩纤维的产量为30~40kt,国外的年产量不足10kt,主要由乌克兰和俄罗斯等国生产,其中以俄罗斯的Kamenny VEK公司较为成熟^[14]。

2.2 玄武岩纤维国内发展现状

我国在玄武岩纤维领域从20世纪70年代的起步探索到如今在CBF技术研发上不断取得关键进展,逐步实现从实验室探索到产业化的转变,技术日益成熟(图2)。在性能和应用研究方面,国内学者对连续玄武岩纤维增强混凝土的力学性能进行了系统研究,发现其显著提升了混凝土的抗压、抗拉、抗冲磨强度和冲击韧性,增强效果优于聚丙烯纤维^[15]。同时,我国已掌握从火焰熔炉到全电熔炉的多种加热技术以及“一步法”生产工艺,实现了自动化控制、无污染排放,并通过改进拉丝技艺进一步提高了生产效率和成本控制水平^[16];同时,2400孔漏板拉丝智能化池窑生产线的投产^[17]标志着广安成为全国唯一同时具备离心纤维和连续纤维池窑拉丝生产能力的城市,我国在玄武岩纤维制造技术上实现重大突破,达到世界领先水平。尽管CBF在国际上已发展多年,我国玄武岩纤维的研究及其综合利用仍处于起步阶段,数据显示,2023年我国玄武岩纤维产量达3.105万吨,市场规模达3.5亿元^[18],远不及同年度我国玻璃纤维行业。

3 玄武岩及其纤维的综合应用

3.1 建筑及土木工程领域

由于再生骨料制成的再生混凝土通常具有

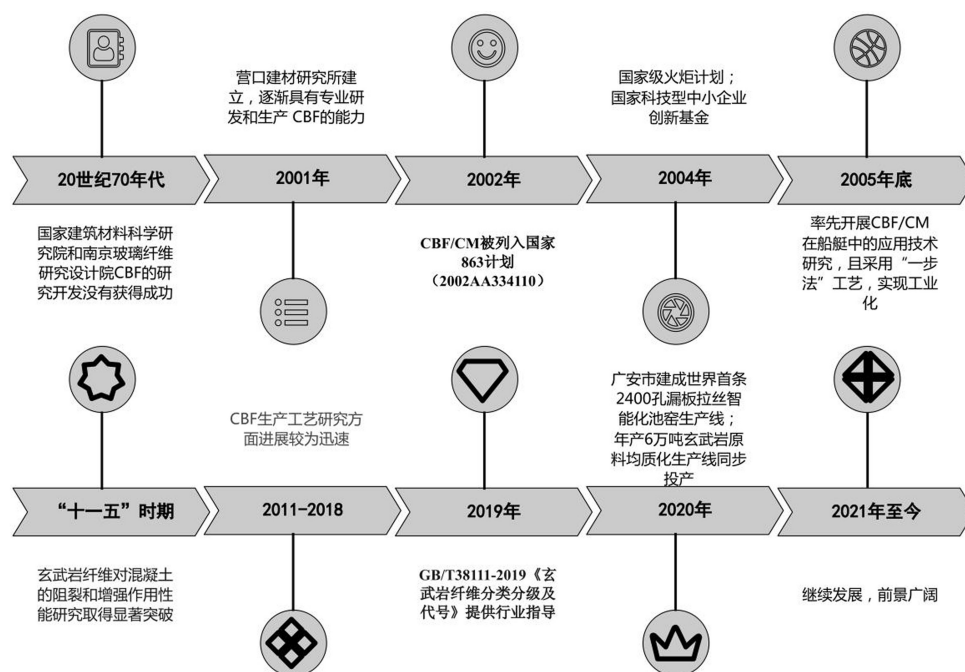


图 2 我国 CBF 发展历程(根据王子焱等^[6]绘制)

较高的孔隙率、较大的吸水性以及较高的压碎指标,导致其在力学强度和耐久性方面不如传统混凝土;然而,玄武岩纤维凭借其成本效益、卓越的力学性能和良好的耐腐蚀性,被认为是提升再生混凝土力学和耐久性能的有力工具之一^[19]。李天窄等^[20]研究发现加入适量的玄武岩纤维可以改善泡沫混凝土的抗拉强度及抗折强度,同时降低干密度,优化导热性能。蒿昭东^[21]的研究也表明,玄武岩纤维能够显著提增强再生骨料透水混凝土力学性能,单一掺量为 2.5% 时,抗折强度提升 20.17%。此外,玄武岩纤维还被用于制备高性能水泥基复合材料,纤维掺量为 2% 时,该材料峰值压应变和压应力均显著提升^[22]。

3.2 道路工程领域

玄武岩纤维能够显著改善沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性。王丽等^[23]研究了 RCA 高模量玄武岩纤维 AC-20C 沥青混合料的路用性能,发现高模量剂掺量为 16% 时,混合料的高温性能最优,而从低温性能和水稳定性考虑,高模量剂掺量为 14% 时更为合适。在实际道路工程中,玄武岩纤维还被用于预防性养护和修复技术中,如 S17 阿拉善右旗——

永昌高速(阿永高速)公路^[24],能够显著提高路面的防渗性能、摩擦系数、抗滑性和抗水损性等性能,封层施工的应用效果明显^[25]。含 10% 玄武岩纤维的沥青修补材料在万能伺服液压试验中表现出优异抗裂性:动态稳定性 6100 次/mm,抗弯拉强度 11.56 MPa,冻融劈裂强度 1.28 MPa,劈裂强度比 84.24%^[26],这些特性有助于提升路面抗裂能力,延长使用寿命,保障行车安全。

3.3 能源领域

玄武岩纤维增强的气密性喷射混凝土技术在提升混凝土的抗弯抗拉强度、减缓碱集料反应、减少回弹量和减碳降碳等多个方面表现出色,具有良好的气密性和耐久性,因此,这项技术能有效应对非煤系地层瓦斯隧道施工中瓦斯成因不明和分布随机性带来的预测难题,防止瓦斯喷涌事故的发生^[27]。玄武岩纤维的耐高温和耐腐蚀性能使其在石油化工领域具有独特优势,可以用于制造与环氧树脂结合的缠绕高压管道,兼具保温和防腐蚀效果^[28]。在新能源领域,锂离子电池在滥用条件下存在热失控风险,易发生燃爆事故,而使用 3.0mm 玄武岩纤维气凝胶时,热

失控预警传感器却成功实现预警^[29]。闫锦锦等^[30]发现玄武岩纤维增强高密度聚乙烯复合材料具有优异的防白蚁性能和热稳定性,适用于电缆护套材料的制造。

3.4 国防军工(航空航天)领域

玄武岩纤维因其轻质、高强、耐腐蚀等特性,在国防军工领域展现出广阔的应用前景,可以用于制造坦克、装甲车、防爆车、防爆毯、炮弹箱以及军事工事的坑道门等^[6],或用于制造飞机机体、装饰件、动力系统构件、滑翔机翼,以及发动机和气动设备废气系统的隔热、隔音材料^[31]。在防弹材料方面,玄武岩纤维增强复合材料在冲击下表现出良好的能量吸收能力,主要表现为拉伸、压缩、分层、剪切断裂和纤维拔脱^[32],纤维直径较小、织物面密度较低的复合材料在相同抗弹面积下具有更好的抗弹性能^[33]。2024年6月,嫦娥六号在月背成功展开“石头版”五星红旗,进一步证明了玄武岩纤维在航空航天领域的独特价值^[34]。这一成果不仅展示了玄武岩纤维在特种材料领域的技术实力,还为其在更广泛领域的应用提供了新的可能性。

3.5 农业领域

玄武岩粉末作为一种多功能土壤改良剂,在农业可持续发展方面发挥着重要作用。它能够显著提高土壤的pH值^[35],并通过风化作用释放出 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等丰富的矿质元素,从而提高土壤的阳离子交换容量(CEC),增强土壤肥力^[36]。研究表明,添加玄武岩粉末可以显著提高土壤中关键营养元素的浓度,同时降低 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 等有毒元素的溶解度至安全水平^[35]。此外,玄武岩粉末的施用还能促进农作物产量的提升。例如,向土壤中添加玄武岩粉末能够提高花生的产量和铁含量,从而改善花生的品质^[37]。硅元素的加入还能通过降低叶片蒸腾速率来提高农作物的保水能力,增强其对干旱的适应能力^[38]。此外,施用玄武岩粉末进行固碳的研究表明,其在全球范围内可从大气中去除 $5 \sim 20 \times 10^8 \text{ t CO}_2/\text{年}$ ^[39]。

3.6 其他领域

除了建材土木、道路工程、能源、航空航天和农业等主要领域,玄武岩纤维的高强度和轻量化特性也使其成为制造汽车、船舶和轨道交通零部件的理想材料。例如,玄武岩纤维可用于生产汽车车身结构件、内饰、排气系统隔热材料以及高温过滤材料等,特别是在汽车制动材料中,同等质量分数(8%)的玄武岩纤维相比玻璃纤维,可使洛氏硬度提高33.8%,冲击强度提升7.45%,摩擦性能更稳定、磨损率更低^[1]。当然,玄武岩纤维在水利电力、地质灾害防治、海洋工程、市政建设及环保等其他多个新兴领域同样展现出广阔的应用前景。

4 玄武岩综合利用的挑战及未来发展方向

4.1 挑战

尽管玄武岩纤维(CBF)具有优异的性能和广泛的应用前景,但其产业发展仍面临诸多挑战。首先,技术瓶颈是制约产业发展的关键问题之一。尽管近年来生产技术取得了显著进步,但在玄武岩纤维拉丝漏板、浸润剂、均化技术、复配技术和熔制技术等关键技术环节仍有待突破^[6]。其次,生产成本居高不下,复杂的生产工艺、高昂的原材料与能源消耗使得产品价格缺乏市场竞争力,限制了其大规模推广应用^[40]。此外,市场竞争激烈,玻璃纤维等其他高性能纤维材料在部分应用领域已深耕多年,拥有成熟的市场体系与客户群体,对玄武岩纤维的市场渗透形成了强有力的阻击。最后,市场认知度较低,宣传力度不够和市场推广不力也影响了其市场占有率。

4.2 未来方向

在技术创新方面,通过采用先进的池窑技术、拉丝漏板技术和自动化控制系统等措施优化生产工艺,不仅可以提高生产效率,还能降低能耗和减少污染物的排放。此外,开发新型复合材料,如高强度、耐高温、抗腐蚀等特种纤维,并探索其在轻质建筑和新能源领域的应用,进一步提升相关的产品的性能。

在应用拓展方面,玄武岩纤维在航空航天、新能源汽车、智能建筑、海洋工程等新兴领域具有巨大的应用潜力,随着科技进步,其应用领域将不断拓展。同时,通过加强市场推广,提升品牌建设和市场认知度,精准洞察客户需求,拓展多元化应用场景,进一步推动玄武岩纤维的广泛应用。

在可持续发展方面,玄武岩纤维作为一种天然、绿色的高性能材料,符合环保和可持续发展的要求。产业需进一步强调绿色生产,减少生产过程中的能源消耗和环境污染,同时加强上下游企业的联系,实现资源共享,推动产业链的整合与规范,提升整个产业链的抗风险能力。

5 结语

玄武岩作为一种资源丰富且附加值高的天然材料,其综合利用能够显著提高资源利用效率并减少浪费,特别是玄武岩纤维(CBF),凭借其优异的稳定性、电绝缘性、抗腐蚀性、抗燃烧性和耐高温性,已成为我国重点发展的四大纤维材料之一,为建材土木、道路工程、能源、国防军工(航空航天)和农业等多个领域提供高性能的材料和解决方案。尽管玄武岩纤维产业在发展过程中还面临着技术瓶颈、市场份额等许多挑战,但随着我国双碳目标的推进、绿色环保要求的提高以及生产技术的不断进步,其发展势头势必强劲有力,逐渐走上节能高效、绿色环保的可持续生产与应用的发展道路。

参考文献(References):

- [1] 岑继周,朱荣海,蒋朝阳,等.玄武岩综合利用研究进展[J].化工设计通讯,2021,47(01):188-189.
- [2] 彭年,崔莹,刘永顺,等.五大连池老黑山火山钾质玄武岩结晶动力学研究[J].岩石学报,2020,36(07):2035-2046.
- [3] 刘治成.峨眉山地幔柱上涌事件的成矿效应——研究进展与展望[J/OL].地质论评,1-23.[2025-03-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1952.p.20241125.1517.016.html>.
- [4] Chen C, Yao Z S, Wang C Y. Partitioning behaviors of cobalt and manganese along diverse melting paths of peridotitic and MORB-like pyroxenitic mantle[J]. Journal of Petrology, 2022, 63(04): egac021.
- [5] 叶琼,戴玉皇,曹卫刚.黔西北玄武岩中铜矿赋存形态与成矿机制研究[J].世界有色金属,2024,39(14):92-94.
- [6] 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.
- [7] Ronald Louis Bonewitz.《自然指南和矿物质》[M].伦敦、纽约、墨尔本、慕尼黑和德里:史密森尼自然指南,2012.
- [8] 钟鸣.岩石揭秘[M].重庆:重庆大学出版社,2023:13-25.
- [9] 颜雪,王力圆,陈洲鑫,等.福建新生代玄武岩及其地幔包体的矿物学特征:对岩石圈地幔性质的制约[J].吉林大学学报(地球科学版),2025,55(02):463-482.
- [10] 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,2022,42(04):173-178.
- [11] 中国复合材料学会.【复材资讯】玄武岩纤维:玻璃纤维和碳纤维的替代品?[EB/OL].(2023-12-04)[2025-03-07].<https://mp.weixin.qq.com/s/gljXyjobNhqusZUFcUMMPg>
- [12] Namrata B, Pai Y, Nair V G. et al. Analysis of aging effects on the mechanical and vibration properties of quasi-isotropic basalt fiber-reinforced polymer composites[J]. Sci Rep, 2024, 14: 26730.
- [13] Malik M, Saxena P. 3D-Printed Continuous Basalt Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composites: Effect of Printing Parameters on Impact and Interlaminar Shear Strength[J]. Journal of Mater Eng and Perform, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-10767-9>
- [14] 检测中心黄工.我国11种高性能纤维全球格局、趋势与战略布局[EB/OL].(2023-06-20)[2025-03-07].<https://zhuanlan.zhihu.com/p/637971260>
- [15] 胡显奇,董国义,鄢宏.玄武岩纤维在建筑和基础设施中的应用[J].工业建筑,2004,34(z1):21-26.