

# 玄武岩纤维基本特征及应用前景分析

宋平<sup>1</sup>, 高欢<sup>2</sup>, 汪灵<sup>1,2</sup>, 郑智仁<sup>2</sup>, 乘舟越洋<sup>2</sup>, 王哲皓<sup>2</sup>

1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 材料与化学化工学院, 四川 成都 610059

中图分类号: TD91; TD985; TQ343 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)04-0173-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.041

**摘要** 连续玄武岩纤维通常是以玄武岩矿石为唯一原料,经高温熔融和拉丝制备而成的一种无机非金属连续纤维材料。它作为一种重要的力学增强矿物功能材料和绿色结构材料,被列入我国重点扶持发展的四大高性能纤维之一。在总结玄武岩纤维的原料特征、拉丝工艺、物化性质等基础上,进一步分析了玄武岩纤维应用的广阔的市场前景,指出玄武岩纤维具有弹性模量高、耐高温、耐腐蚀、吸音系数较高、电绝缘性良好等优良性能,且性价比优势明显,可在一些领域中取代高性能高价格纤维。同时,玄武岩纤维还具有自己独特的优良物化性质,如耐湿、耐海水、耐化学腐蚀和耐高低温,在一些应用领域具有不可替代的作用。因此,应加大玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺研究和推广应用。

**关键词** 玄武岩纤维; 拉丝工艺; 玄武岩; 矿物功能材料; 绿色结构材料

## 引言

连续玄武岩纤维(Continuous basalt fiber),简称玄武岩纤维(CBF),通常指以玄武岩矿石为唯一原料,经高温熔融( $\pm 1\ 500\ ^\circ\text{C}$ )、铂铑合金漏板快速拉丝( $1\ 320\ \sim\ 1\ 450\ ^\circ\text{C}$ )制备的一种非晶态无机非金属连续纤维<sup>[1]</sup>。玄武岩纤维被誉为是21世纪的新材料,与碳纤维、芳纶纤维、高分子量聚乙烯纤维一道被国家列为重点发展的四大高技术纤维。玄武岩纤维主要由硅氧四面体和铝氧四面体通过共用氧角顶的方式连接形成连续的线性结构。玄武岩纤维长度可达数十千米,是一种非晶态、近程有序、远程无序的无机纤维材料。如图1所示,玄武岩纤维的外表具有金属光泽,它的表面形态与其他人造化学纤维相似,整体呈光滑的圆柱形,缺陷较少<sup>[2]</sup>。玄武岩纤维具有较高的抗拉强度和弹性模量、耐酸碱性好、服役寿命长、无污染、工作温度范围宽和吸湿性低等特点<sup>[3]</sup>,是一种十分重要的力学增强功能矿物材料,在轻质高强复合材料领域中有着越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。相比于碳纤维、高分子量聚乙烯纤维、芳

纶纤维和玻璃纤维等,玄武岩纤维是唯一使用天然的单一矿石原料,在无需任何添加剂的条件下,生产制备的绿色环保结构材料<sup>[1]</sup>。玄武岩纤维生产原料来源丰富,生产成本低<sup>[4-6]</sup>,综合性能优异,用途广泛,大力开发玄武岩纤维及其制品具有较好的经济和社会效益。

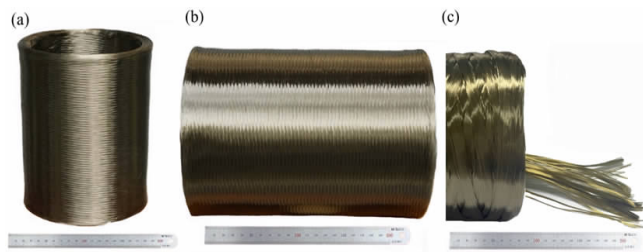


图1 连续玄武岩纤维数码照片  
Fig. 1 The digital photos of CBF

## 1 玄武岩纤维原料

玄武岩是由基性岩浆在地表快速冷凝形成的致密块状或气孔状的基性喷出岩(图2),是组成地球洋壳

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972039); 四川省科技计划项目(2020YFS0391)

作者简介: 宋平(1998—),女,在读硕士研究生,研究方向为岩石学、矿物学、矿床学, E-mail: songping053@163.com。

通信作者: 汪灵(1958—),男,教授(博士),博士生导师,矿物学专业,研究方向:应用矿物学(矿物材料学), E-mail: wangling@cdut.edu.cn。

和陆壳的重要岩石。玄武岩的原料特征对纤维拉丝工艺和物化性能起决定性作用。玄武岩的主要化学组分为  $\text{SiO}_2$  (45% ~ 52%)、 $\text{TiO}_2$  (1% ~ 3%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12% ~ 18%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$  (9% ~ 15%)、 $\text{CaO}$  (6% ~ 10%)、 $\text{MgO}$  (5% ~ 10%)、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (3% ~ 10%)；玄武岩的主要矿物为辉石和基性斜长石,次要矿物为橄榄石、角闪石、石榴子石、绿泥石等,副矿物为磁铁矿、钛铁矿等,此外还可含一定量的玻璃质;玄武岩的结构主要是斑状结构 and 无斑隐晶质结构,基质具间粒结构、间隐结构、拉斑玄武结构、玻璃质结构等;其主要构造为块状构造、气孔状构造、杏仁状构造(杏仁体中的填充物质主要为绿泥石和石英等)和柱状解理构造等<sup>[7]</sup>。

玄武岩的种类较多,分布十分广泛,根据化学成分可分为碱性玄武岩、钙碱性玄武岩、拉斑玄武岩和高铝玄武岩;根据矿物组成可分为橄榄玄武岩、辉石玄武岩等;按结构构造可分为粗玄武岩、玄武岩、玻璃玄武岩、气孔玄武岩、杏仁玄武岩等。玄武岩在世界各地均有分布,俄罗斯玄武岩储量非常丰富,主要分布在乌拉尔、堪察加半岛、库页岛、科拉半岛、西伯利亚西北部和外高加索等地;菲律宾、美国西部、印度等地也有广泛分布的玄武岩;乌克兰的玄武岩分布比较广,且特别适合纤维加工<sup>[8]</sup>。中国的玄武岩资源分布十分广泛,主要在四川、云南、贵州、河北、甘肃、黑龙江、青海、河南、安徽、海南、山东等地<sup>[9-12]</sup>。尽管玄武岩资源在全球分布广泛,然而研究表明,并非所有种类的玄武岩都能用于生产玄武岩纤维,只有组成和结构符合特定要求的某种类型才能用于拉丝<sup>[13]</sup>。

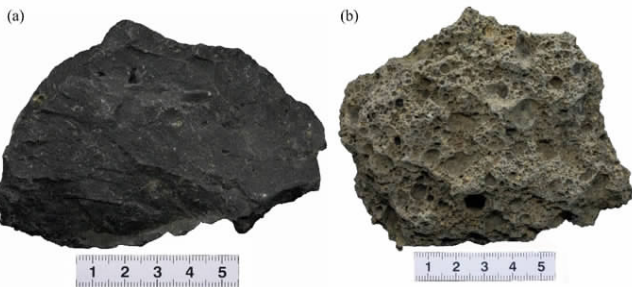


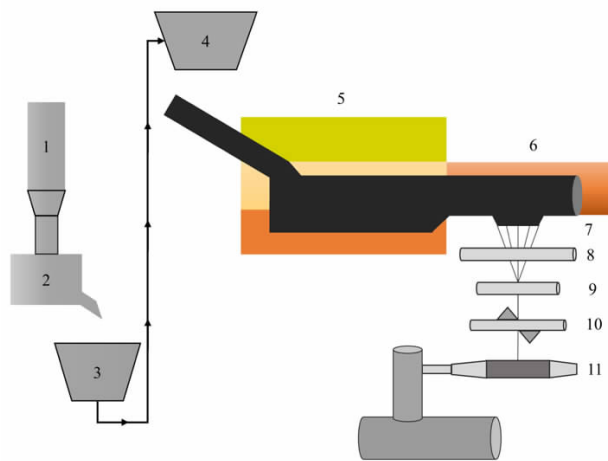
图2 玄武岩数码照片(a: 致密块状, 产自黑龙江鸡西; b: 气孔状, 产自内蒙古多伦县滦源镇)

Fig. 2 Digital photos of basalt (a: Compact block, from Jixi, Heilongjiang; b: Stromatal shape, produced in Luanyuan Town, Duolun County, Inner Mongolia)

## 2 玄武岩纤维加工制备及拉丝工艺性能

玄武岩纤维的生产方式主要为池窑,其总体生产流程如图3所示,大致可以分为以下4个步骤<sup>[1,10]</sup>:

(1) 投料:将粉碎后玄武岩原料放入储藏器里,然后按照一定的程序定时、定量、均匀地投到熔样炉里;(2) 熔样:在熔样炉中通过电或气或电气结合的方式,将原料熔化为成分均匀、温度和黏度稳定的熔体,熔融温度约  $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ ;(3) 转移熔体:将熔体转移到拉丝系统中,漏板上方需保持恒温 and 均匀;(4) 拉丝:熔体通过漏板,在自重的作用下牵拉成丝,集合成束,在快速缠绕作用下,不断拉伸变细,拉丝温度一般为  $1\ 320\sim 1\ 450\ ^\circ\text{C}$ 。



1—碎石筒仓; 2—料斗; 3—运输系统; 4—分批加料装置; 5—初始熔融区; 6—二次加热区, 温度控制精确; 7—漏板及拉丝; 8—施绞器; 9—形成缕丝; 10—纤维张紧装置; 11—自动缠绕装置

图3 玄武岩纤维生产流程示意图<sup>[10,19]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of basalt fiber production process

其中,熔制工艺和纤维成型工艺是玄武岩纤维拉丝生产的重要环节,其主要取决于原料的成分均匀性、熔化温度、黏度、析晶温度和拉丝温度等工艺性能,并对玄武岩熔体的均质性和纤维成型稳定性具有十分重要的影响<sup>[14]</sup>。Dzhigiris 等<sup>[15]</sup>研究了乌克兰和格鲁吉亚的三种玄武岩的黏度、熔化温度和工作温度,结果表明原料熔化温度范围在  $1\ 175\sim 1\ 350\ ^\circ\text{C}$  区间适用于生产玄武岩纤维,工作温度的黏度为  $10\sim 30\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ ,工作温度下,玄武岩熔体与铂铑合金的接触角为  $14^\circ\sim 17^\circ$ ,低于铝硅酸盐玻璃。Makhova 等<sup>[16-17]</sup>研究发现适合生产超细玄武岩纤维的原料应具有中等黏度,即玄武岩熔体在  $1\ 450\ ^\circ\text{C}$  时黏度为  $30\sim 55\ \text{dPa}\cdot\text{s}$ ,在  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$  时黏度为  $180\sim 310\ \text{dPa}\cdot\text{s}$ ,黏滞活化能不超过  $290\ \text{kJ/mol}$ ,析晶上限温度要小于  $1\ 290\ ^\circ\text{C}$ ;隐晶质玄武岩在  $1\ 100\sim 1\ 450\ ^\circ\text{C}$  这个区间熔化,形成的玻璃熔体是无微晶的,有利于玄武岩超细纤维的生产。刘嘉麒<sup>[10]</sup>提出熔体的黏度基本上与温度成反比,温度升高,黏度相对降低;碱性组分增多,黏度降低;反之,酸性组分增多,黏度增大,不利于拉丝。梁磊等人<sup>[18]</sup>研究了辽宁

建平、黑山和黑龙江鸡西的玄武岩熔制工艺性能,发现玄武岩玻璃的析晶温度范围为 1 100 ~ 1 310 ℃;根据以往的经验,拉丝温度要高于析晶上限温度 40 ~ 50 ℃,确定拉丝最高温度为 1 350 ℃。

玄武岩纤维的拉丝工艺方面目前还存在一些问题,各玄武岩纤维企业在纤维制造方面,生产技术水平存在一定差异:(1)熔制效率低、能源成本高。在窑炉技术方面,我国玄武岩纤维企业主要使用全电熔炉和气电结合炉两种,目前主要存在的在问题,如熔制效率低、产量低、熔化不充分等,目前一般采用的拉丝漏板数为 400 或 600 孔,少数企业可达到 800 ~ 1 200 孔甚至更大,与普通玻璃纤维采用的 4 000 ~ 8 000 孔的漏板相比,生产效率十分低下。(2)浸润剂技术复杂。浸润剂是玄武岩纤维制备的关键性助剂,对增强纤维的润滑性、抗静电性、黏连性等具有十分重要的作用;目前,浸润剂存在品种单一、配方设计复杂、使用工艺难度大等问题。(3)漏板易遭腐蚀、更换成本高。目前玄武岩纤维生产厂家主要采用铂铑合金漏板,电熔加热方式会使铁氧化物向窑底富集,并加速对铂铑合金的侵蚀,缩短漏板的使用寿命,使生产成本增加<sup>[20]</sup>。

### 3 玄武岩纤维主要物化性质

玄武岩纤维具有优良的物理和化学性能。表 1 为几种常见纤维的主要性能对比。玄武岩纤维直径为微米级(±10 μm),表面平整光滑,密度 2.65 ~ 3.00 g/cm<sup>3</sup>,最高工作温度 650 ℃,莫氏硬度 5 ~ 6,低热导率(0.035 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>),高吸音系数(0.95),电绝缘性能好,良好的吸波功能和透波功能,抗紫外线、防辐射、防电磁,燃烧烟密度低、无熔滴、无毒性、无污染;机械力学性能优良,抗拉强度 3 000 ~ 4 840 MPa,弹性模量 79.3 ~ 110 GPa,并具有优异的耐磨抗拉增强性能,比大丝束碳纤维和芳纶都要高,与 S - 玻璃纤维相当;

表 1 玄武岩纤维与其他纤维主要性能比较

Table 1 Main performance comparisons of basalt fibers and others

纤维类型	密度 (g · cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	弹性模量 /GPa	延伸率 /%	绝缘 性能	是否生产 环保	是否 成本
玄武岩纤维	2.80	3 000 ~ 4 840	79.3 ~ 110	3.1	是	是	低
碳纤维	1.78	3 500 ~ 6 000	230 ~ 600	1.5 ~ 2.0	否	否	高
芳纶纤维	1.45	2 900 ~ 3 400	70 ~ 140	2.4	是	否	高
S - 玻璃纤维	2.54 ~ 2.57	4 020 ~ 4 650	83 ~ 86	5.3	是	否	低
E - 玻璃纤维	2.54	3 100 ~ 3 800	72.5 ~ 75.5	4.7	是	否	低

注:(1) S - 玻璃纤维为高强玻纤, E - 玻璃纤维为无碱玻纤;(2) 据刘嘉麒<sup>[10]</sup>和石钱华<sup>[21]</sup>整理。

低吸湿性(<0.1%),耐湿性和耐腐蚀性能优良,海水环境稳定性强,如表 2 所示,玄武岩纤维在水、酸和碱的溶液中质量损失率均低于 S - 玻璃纤维和 E - 玻璃纤维<sup>[1]</sup>。表 3 为几种常见纤维的主要热性能比较,可见玄武岩纤维具有优良的热性能,玄武岩纤维可承受的温度和最高使用温度范围优于碳纤维、S - 玻璃纤维和 E - 玻璃纤维。

表 2 玄武岩纤维与其他纤维耐化学腐蚀性能比较

Table 2 Comparison of chemical resistance properties of basalt fiber with others

纤维类型	在水中煮沸 3 h 后质量损失/%	在 NaOH 中煮沸 3 h 后质量损失/%	在 HCl 中煮沸 3 h 后质量损失/%
玄武岩纤维	1.60	2.75	2.20
S - 玻璃纤维	5.00	5.00	15.70
E - 玻璃纤维	6.20	6.00	38.90

注:引自 Jamshaid et al. <sup>[8]</sup>。

表 3 玄武岩纤维与其他纤维热性能比较

Table 3 Comparison of thermal properties of basalt fiber with others

纤维类型	可承受的 温度/℃	最高使用 温度/℃	熔化温 度/℃	导热系数/ (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	热膨胀系数 (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
玄武岩纤维	-260 ~ +800	650	1450	0.031 ~ 0.038	8.0
碳纤维	-5 ~ +700	500	/	/	/
S - 玻璃纤维	50 ~ +300	250	1550	0.034 ~ 0.04	5.4
E - 玻璃纤维	-50 ~ +450	300	1120	0.034 ~ 0.04	5.4

注:引自汪灵<sup>[1]</sup>;Sergeev et al. <sup>[22]</sup>;Olafsson et al. <sup>[23]</sup>;Haeberle et al. <sup>[24]</sup>。

### 4 玄武岩纤维应用前景分析

据统计,2021 年我国玻璃纤维产量达到 624 万 t<sup>[25]</sup>。玄武岩纤维与玻璃纤维同属于硅酸盐纤维材料,其生产过程绿色环保,理论成本较低,物化性能优越,性价比优势明显。据统计,2021 年国内玄武岩纤维产量仅为 1.2 万 t<sup>[26]</sup>,若玄武岩纤维的用量达到玻璃纤维的 20% ~ 30%,则每年可产生 124.8 ~ 187.2 万 t 的用量需求,其市场前景十分广阔。

对于玄武岩纤维的推广应用,应根据其物化性质特点在可替代性和不可替代性方面下功夫。“可替代”是指根据玄武岩纤维优良的物化性质,在碳纤维、芳纶纤维等高性能、高价格纤维已有的应用领域中,哪些可被玄武岩纤维替代。“不可替代”是指根据玄武岩纤维独特的物化性质,在哪些应用领域中,可进一步开发出具有不可被替代性的新材料产品。基于玄武岩

纤维的可替代性和不可替代性特点,可在交通运输、建筑建材、碳中和及新能源、石油化工、海洋工程、水利电力与地质灾害防治等应用领域,开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺研究。

(1) 交通运输领域。可开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开发研究,例如:汽车和轨道车辆用复合材料,道路、桥梁、隧道、地铁等基础设施建设用材料、受电/绝缘系统结构件等,运载工具(高速列车、磁悬浮列车、汽车、舰船、无人机、飞机等)轻量化应用复合材料新产品。

(2) 碳中和及新能源领域。可以开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开发研究,例如:新型储能材料、锂离子电池器件增强材料,城市管网、风-光电用复合材料(海上风电叶片、风光互补支架)、电力输送复合材料杆塔和桥架、复合电缆芯和超高压绝缘用复合材料、节能建筑复合材料等。

(3) 水利电力与地质灾害防治领域。可以开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开发研究,拓展玄武岩纤维在国家水利电力与地质灾害防治重点工程中的应用。

(4) 建筑建材与土木工程领域。玄武岩纤维耐碱和高低温性能优良,可以在建筑建材与土木工程领域,尤其是高寒地区开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开发研究,例如:玄武岩纤维材料在川藏铁路(公路)建设中的应用关键技术,玄武岩纤维(岩棉)建筑保温材料制品,玄武岩纤维材料在水泥混凝土设计方面的应用开发,玄武岩纤维在桥梁、隧道、装配式建筑以及建筑轻量化等土木工程领域应用开发。

(5) 环境工程领域。玄武岩纤维耐水、化学、生物腐蚀性性能优良,可以在环境工程领域,开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开发研究,以及水、土、气环境保护与治理工程应用开发研究,如高温滤料等。

(6) 石油与天然气工程领域。玄武岩纤维有机气体的耐受性能优良,可以在石油与天然气工程领域,开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开发研究,例如:油气、冷热液、散料等管道输送用玄武岩纤维复合材料及其制备技术,长距离高压输送氢气管道用玄武岩纤维复合材料及其制备技术,玄武岩纤维在石油和天然气工程管道、储罐和装备等。

(7) 化学化工领域。玄武岩纤维耐化学腐蚀性性能优良,可以在化学化工领域,尤其是重化工领域,开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺开

发研究,例如:在盐湖提锂、矿石提锂等重化工生产中的管道、储罐和装备材料等。

(8) 海洋工程领域。玄武岩是构成大洋壳的重要组成部分,由其所制成的玄武岩纤维耐海水腐蚀性性能优良,因此可以在海洋工程领域,开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺的开发研究,拓展连续玄武岩纤维在海洋工程和海岛建设工程中的应用,例如:海场风-光伏发电材料、海沙混凝土材料、耐腐蚀复材制品(复合筋及各种型材)、油气田开采制品等。

## 5 结语

随着我国双碳目标的不断推进,绿色环保要求的不断提高,玄武岩纤维生产技术的不断发展,玄武岩纤维必将在我国高新技术材料领域受到越来越多的重视,加强玄武岩纤维的应用和基础性研究,具有重要的意义。

(1) 玄武岩纤维是一种十分有前景的力学功能矿物材料和绿色结构材料。玄武岩纤维具有抗拉强度高、弹性模量高、耐海水和化学腐蚀性性能好、服役寿命长、无污染、工作温度范围宽和吸湿性低等特点。

(2) 玄武岩纤维性价比优势明显,可在一些领域中取代高性能高价格的芳纶纤维和碳纤维。同时,玄武岩纤维还具有独特的优良物化性质,在海水、强化学腐蚀和极端高低温等苛刻环境下,具有不可替代的作用。

(3) 应结合玄武岩纤维的可替代性和不可替代性特点,在交通运输、建筑建材、碳中和及新能源、石油化工、海洋工程、水利电力与地质灾害防治等应用领域,开展玄武岩纤维轻质高强材料及复合材料新产品新工艺研究和推广应用,从而有望在国内形成上百万吨级的市场规模。

## 参考文献:

- [1] 汪灵. 矿物材料学原理[M]. 北京:地质出版社,2021:640.  
WANG L. Principle of mineral material science [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021: 640.
- [2] 周理洋,林加剑,韦天下,等. 玄武岩力学性能及其破坏特征试验研究[J]. 防护工程,2020,42(3):19-25.  
ZHOU L Y, LIN J J, WEI T X, et al. Experimental study on mechanical properties and failure characteristics of basalt [J]. Protective Engineering, 2020, 42(3): 19-25.
- [3] 刘嘉麒. 绿色高新材料—玄武岩纤维具有广阔前景[J]. 科技导报, 2009,27(9):5.  
LIU J Q. A kind of new high-tech green material: basalt fiber, its bright prospect in applications [J]. Science and Technology Review, 2009, 27(9): 5.
- [4] 居志纲,施李萍,孙丽华,等. 玄武岩纤维加强件在光缆上的应用

- [J]. 现代传输, 2014(1): 76-79.
- JU Z G, SHI L P, SUN L H, et al. Application of basalt fiber reinforcement in optical cable [J]. *Modern Transmission*, 2014(1): 76-79.
- [5] 华康. 连续玄武岩纤维复合材料船体抗爆性能分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- HUA K. Analysis for the explosion resistant capability of CBF ship [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [6] DHAND V, MITTAL G, RHEE KY, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 73: 166-180.
- [7] 肖渊甫, 郑荣才, 邓江红. 岩石学简明教程[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- XIAO Y F, DENG R C, DENG J H. Brief course of petrology (3rd Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [8] JAMSHAI D H, MISHRA R. A green material from rock: basalt fiber - a review (Review) [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2016, 107(7): 923-937.
- [9] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-217.
- LIU J Q. Volcanoes in China [M]. Beijing: Science Press, 1999: 1-217.
- [10] 刘嘉麒. 玄武岩纤维材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- LIU J Q. Basalt fiber material [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- [11] 付法凯, 石毅, 汪江河, 等. 河南大安玄武岩生产连续纤维的可利用性探讨[J]. *中国非金属矿业导刊*, 2009(1): 53-56.
- FU F K, SHI Y, WANG J H, et al. Explore the availability of henan daan basalt manufacturing basalt continuous fibers [J]. *China Non-Metallic Mineral Industry Guide*, 2009(1): 53-56.
- [12] 周新民, 陈图华. 我国东南沿海新生代玄武岩的成分和演化特征[J]. *地质学报*, 1981(1): 29-40.
- ZHOU X M, CHEN T H. Composition and evolution of cenozoic basaltic rocks in southeastern coastal province of China [J]. *Journal of Geology*, 1981(1): 29-40.
- [13] 王屹, 余骁, 张建军, 等. 玄武岩纤维的开发及应用[J]. *玻璃纤维*, 2017(4): 28-31.
- WANG Y, YU X, ZHANG J J, et al. Development and application of basalt fiber [J]. *Glass Fiber*, 2017(4): 28-31.
- [14] 陈兴芬. 连续玄武岩纤维的高强度化研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- CHEN X F. Study on the high strength and performance of continuous basalt fiber [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [15] DZHIGIRIS DD, MAKHOVA MF, BOCHAROVA IN, et al. Production of fine staple fibers from gabbro [J]. *Stekloi Keramika*, 1989(3): 6-7.
- [16] MAKHOVA MF, GORBACHEV GF, BOCHAROVA IN, et al. Production of superfine fibers from molten rocks [J]. *Stekloi Keramika*, 1984(8): 13-15.
- [17] MAKHOVA MF, BOCHAROVA IN, MISHCHENKO ES, et al. Glass fiber from rock [J]. *Stekloi Keramika*, 1989(9): 27-28.
- [18] 梁磊, 梁玉舫, 李谨. 玄武岩纤维物化性能的研究[J]. *玻璃纤维*, 2006(1): 15-19.
- LIANG L, LIANG Y F, LI J. Study of physical and chemical properties of basalt fiber [J]. *Glass Fiber*, 2006(1): 15-19.
- [19] DEAK T D, CZIGANY T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison [J]. *Textile Research Journal*, 2009, 79(7): 645-651.
- [20] 王森, 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.
- WANG M, SHEN Y Q, WU H L. Development status and trend of basalt fiber [J]. *Textile Review*, 2021(5): 50-53.
- [21] 石钱华. 国外连续玄武岩纤维的发展及其应用[J]. *玻璃纤维*, 2003(4): 27-31.
- SHI Q H. Development and application of continuous basalt fiber abroad [J]. *Glass Fiber*, 2003(4): 27-31.
- [22] SERGEEV V P, CHUVASHOV Y N, GALUSHCHAK O V, et al. Basalt fibers - A reinforcing filler for composites [J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1994, 33: 555-557.
- [23] LAFSSON H, TORHALLSSON E. Basalt fibre bar reinforcement of concrete structures [J]. *Reykjavik University*, 2009: 5-12.
- [24] HAEBERLE D C, SENNE J L, LESKO J J, et al. Performance and interfacial stresses in the polymer wear surface/FRP deck bond due to thermal loading [C] // *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*; 3rd International Conference, August. 2000: 13-15.
- [25] 华经情报网. 2021年中国玻璃纤维现状分析, 下游需求激增, 产量增长迅速 [EB/OL]. (2022-05-24) [2022-06-15]. [http://www.360doc.com/content/22/0512/20/37146736\\_1031048265.shtml](http://www.360doc.com/content/22/0512/20/37146736_1031048265.shtml).
- Hua Jing Information Network. Analysis of the status quo of glass fiber in China in 2021 shows that downstream demand is surging and production is growing rapidly [EB/OL]. (2022-05-24) [2022-06-15]. [http://www.360doc.com/content/22/0512/20/37146736\\_1031048265.shtml](http://www.360doc.com/content/22/0512/20/37146736_1031048265.shtml).
- [26] 华经市场研究中心. 国内玄武岩连续纤维生产企业及行业发展前景分析 [EB/OL]. (2022-05-24) [2022-06-15]. [https://www.sohu.com/a/550210582\\_372052](https://www.sohu.com/a/550210582_372052).
- Hua Jing Market Research Center. Analysis of domestic basalt continuous fiber production enterprises and industry development prospects [EB/OL]. (2022-05-24) [2022-06-15]. [https://www.sohu.com/a/550210582\\_372052](https://www.sohu.com/a/550210582_372052).