

海南岛玄武岩石粉废渣制备连续纤维实验研究

李 玢^{1,2}, 徐冠立², 官 军^{1,3}, 殷诗勤³, 刘 荣², 王梦潇⁴, 胡 阳⁴

(1. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口 570206; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;
3. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206; 4. 四川省地质矿产勘查开发局一〇六地质队, 四川 成都 610081)

摘要: 玄武岩石粉废渣是玄武岩石材破碎加工过程中产生的废料,其粒度细、销路差,尚无成熟的大规模综合利用方法。本文采集海南岛不同地区的8组玄武岩石粉废渣,利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)和X射线衍射仪(XRD)分析其化学成分和矿物组分,通过差示扫描量热仪(DSC)、能谱仪(EDS)及熔融实验分析其结晶性能,筛选出最符合玄武岩纤维原料特征的样品进行纤维制备研究。通过扫描电子显微镜(SEM)及XRD分析纤维表面形貌与结晶晶相,将其性能与标准纤维进行对比。结果表明,1450℃时制得的纤维频繁断丝,表面结晶出大量树枝状及针状的硅灰石、石英、黄长石和磁铁矿;升温至1480℃并保温1h后成功制得的连续纤维,仍含有黄长石和磁铁矿,断裂强度略低于标准纤维。研究结果表明利用海南岛玄武岩石粉废渣制备连续纤维具有一定可行性,本研究为海南岛玄武岩石粉废渣的处理提供了导向性建议和理论基础。

关键词: 玄武岩石粉废渣; 玄武岩纤维; 拉丝实验; 海南岛; 结晶; 固废利用

中图分类号: P588.14⁺5; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0663-10

An experimental study on the preparation of continuous fiber from basalt waste powder in Hainan Island

LI Zhen^{1,2}, XU Guan-li², GUAN Jun^{1,3}, YIN Shi-qin³, LIU Rong², WANG Meng-xiao⁴ and HU Yang⁴

(1. Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China; 2. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Hainan Institute of Geological Survey, Haikou 570206, China;
4. 106 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: The basalt waste powder is a by-product of the crushing and processing of basalt stone. It has a fine grain size and is difficult to sell, and there is currently no widely adopted method for comprehensive utilization on a large scale. In this study, eight groups of basalt waste powder from different areas of Hainan Island were selected for analysis. The chemical and mineral composition of the basalt waste powder was determined by inductively coupled plasma emission spectrometer (ICP-OES) and X-ray diffractometer (XRD). The crystallization properties of the basalt waste powder were analyzed by differential scanning calorimeter (DSC), energy dispersive spectroscopy (EDS), and melting experiments. The surface morphology and crystal phase of the fibers prepared from the basalt waste powder were examined by scanning electron microscope (SEM) and XRD, and their properties were compared to those of standard fibers. The results revealed that the fiber prepared at a temperature of 1450℃ tended to break frequently, and there was a significant presence of dendritic and acicular crystals on the fiber surface. These

收稿日期: 2023-04-27; 接受日期: 2023-08-10; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 四川省自然科学基金(2023NSFSC0291); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放课题(HNHYZZYHJKF016)

作者简介: 李 玢(1997-), 男, 硕士研究生, 从事岩石矿物材料的研究, E-mail: lizhen13127@163.com; 通讯作者: 徐冠立(1983-), 男, 副教授, 从事成因与应用矿物学、矿物材料及环境矿物的研究, E-mail: guanine.xu@gmail.com。

网络首发时间: 2023-08-24; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20230822.1631.002.html>

crystals were identified as wollastonite, quartz, melilite, and magnetite. After raising the temperature to 1 480°C and maintaining it for 1 hour, continuous fiber was successfully obtained. However, the breaking strength of the fiber was slightly lower than that of standard fibers. Melilite and magnetite were also detected in the fiber. These results validate the feasibility of preparing continuous fiber from basalt waste powder from Hainan Island. This study offers practical guidance and a theoretical foundation for the treatment of basalt waste powder on Hainan Island.

Key words: basalt waste powder; basalt fiber; wire drawing test; Hainan Island; crystallization; solid waste utilization

Fund support: Natural Science Foundation of Sichuan Province (2023NSFSC0291); Open Project of Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment (HNHYDZZYHJKF016)

海南岛北部广泛分布新生代玄武岩,面积达 4 159.79 km²,厚度大于 1 km,是中国东南部玄武岩出露面积最大的地区(黄镇国等,1993)。玄武岩因具有耐磨性好、硬度大、抗腐蚀性强等特点,广泛用于路面石料和建筑材料(霍泳霖等,2022)。

海南有多家玄武岩石料企业生产玄武岩碎石和玄武岩机制砂,在破碎加工过程中产生了大量细粒玄武岩石粉,一般占有产品质量的 25%~35%。这种玄武岩石粉粒度细、配级差,是建筑石料产品中销路最差的一种产品,且目前尚无成熟的大规模综合利用方法,只能做堆放处理,造成了严重的环境压力和资源浪费。玄武岩石粉是玄武岩冷加工后的产物,其化学成分、矿物组成与玄武岩相同,因此可利用玄武岩石粉经配料、粉磨、熔融、拉丝等工艺制成玄武岩纤维。

玄武岩纤维是以天然玄武岩或成分相近的其他岩石为原料,经 1 450~1 500°C 熔融后通过铂铑合金漏板高速拉制而成的连续纤维。它是一种新型无机环保高性能纤维材料,具有抗摩擦性、耐化学腐蚀性、电绝缘性、耐高温性等多种优异性能。我国将玄武岩纤维与碳纤维、芳纶纤维以及高分子量聚乙烯纤维列为重点发展的四大高技术纤维。目前玄武岩纤维已在纤维增强复合材料、摩擦材料、隔热材料、汽车行业以及高温过滤织物等多个领域得到了广泛应用,还将被应用于尖端技术领域的高强度、耐高温、防辐射等复合材料的合成与制备(陈兴芬,2018; Li *et al.*, 2021; 宋平等, 2022)。利用玄武岩石粉制备玄武岩纤维,既能有效缓解尾矿对环境的污染,也能充分利用自然资源,达到变废为宝的目的。

本文以海南岛不同地区采集的 8 组玄武岩石粉废渣样品作为研究对象,通过对石粉的化学成分、矿物组分以及结晶性能分析,筛选出最满足玄武岩纤

维原料特征的样品进行拉丝实验,探讨以玄武岩石粉废渣作为玄武岩纤维生产原料的可行性并分析所得纤维性能,以期为海南岛玄武岩石粉废渣的合理利用提供科学依据。

1 样品与表征

1.1 样品采集

收集的 8 组玄武岩石粉废渣样品,原岩均为海南岛北部的新生代玄武岩(图 1)。该套玄武岩被划分为 5 个喷发期次,从早到晚依次为:中新世-上新世石马村组(N₁sm)和石门沟村组(N₂s),主要岩性为辉斑橄榄玄武岩、粗玄岩、火山碎屑岩以及玻基橄辉岩夹杂砂砾岩与黏土岩;早更新世晚期-中更新世早期多文组(Qp²d)下段,主要岩性为橄榄玄武岩、橄榄辉石玄武岩和粗玄岩;中更新世晚期多文组(Qp²d)上段,主要岩性为石英拉斑玄武岩、橄榄拉斑玄武岩;晚更新世道堂组(Qp³d),主要岩性为玄武岩、沉凝灰岩;全新世石山组(Qh¹s),主要岩性为橄榄玄武岩、含火山角砾橄榄玄武岩(樊祺诚等,2004; Wang *et al.*, 2012; 刘建强等, 2013; 李孙雄等, 2017; 梅盛旺, 2018)。8 组样品分别采集于石山石场(SS)、铂锐石场(BR)、仁雅石场(RY)、美鳌村(MAC)、美台村(MTC)、福岭石场(FL)、北昌石场(BC)、华新石场(HX),样品原岩囊括全部 5 套地层。

1.2 玄武岩玻璃制备方法

石粉样品高温熔融实验于成都理工大学地球科学学院应用矿物实验室完成。分别取 5 g 研磨至 200 目的 MAC 和 MTC 石粉放入刚玉坩埚,使用 SAFTherm STM-8-17 型高温马弗炉将坩埚内样品从室温以 10 °C/min 升温至 1 400°C 并保温 1 h,随炉冷却后得到玄武岩玻璃。

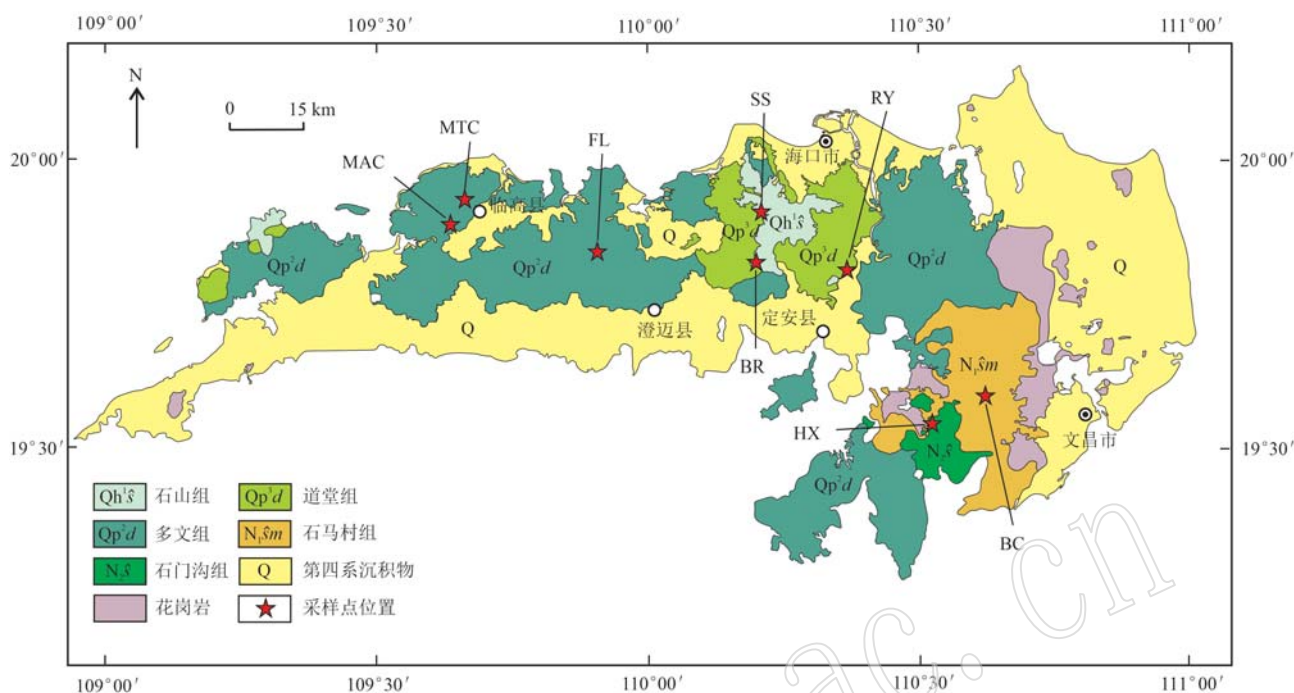


图1 海南岛北部新生代玄武岩分布及采样位置

Fig. 1 Distribution and sampling positions of Cenozoic basalts in northern Hainan Island

1.3 测试方法

玄武岩石粉化学成分分析于成都谱谱检测技术有限公司完成,仪器型号为PE 5300V型电感耦合等离子体发射光谱仪。

样品矿物组分分析于成都理工大学地球科学学院X射线粉晶衍射实验室完成,使用200目粉末样品。仪器型号为Bruker D8 ADVANCE型X射线衍射仪,测试条件为工作电压40 kV,工作电流40 mA。对于玄武岩石粉,扫描范围为 $5^{\circ} \sim 40^{\circ}$,扫描时间0.5 s,使用0.6 mm固定狭缝;对于玄武岩玻璃,扫描范围为 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$,扫描时间1.0 s,使用1.0 mm固定狭缝。

玄武岩玻璃表面形貌观察及能谱分析于成都理工大学地球科学学院扫描电镜实验室完成。仪器型号为FEI Nova NanoSEM 450型场发射扫描电子显微镜。

玄武岩石粉高温差示扫描量热分析于重庆大学分析测试中心完成,使用200目粉末样品。仪器型号为NETZSCH DSC 404 F3型差示扫描量热仪,测试条件为氩气气氛,从室温升温至 1400°C ,升温速率 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

2 样品特征

2.1 化学成分特征

玄武岩中不同氧化物对纤维制备所起作用不同,其中, SiO_2 是玄武岩纤维中的主要成分,可以提高熔体的黏度,增强纤维的力学性能和化学稳定性;适量的 Al_2O_3 有利于提高纤维的化学稳定性和热稳定性; Fe_2O_3 和 FeO 会影响熔体的黏度以及纤维的热稳定性等性能; MgO 和 CaO 有利于原料的熔化但也会增加结晶倾向; Na_2O 和 K_2O 可以降低熔体的聚合度以及熔化温度; TiO_2 会使熔体黏度变大并提高纤维的化学稳定性(魏斌, 2011; 刘昶江等, 2020)。除了对成分区间的严格限定外,筛选可拉丝原料时还会对酸度系数(M_k)做出要求(Meng *et al.*, 2021):

$$M_k = [w(\text{SiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3)] / [w(\text{CaO}) + w(\text{MgO})] \quad (1)$$

OSNOS等(2005)提供了一种以玄武岩矿石为唯一原料制备玄武岩纤维的工艺方法,并给出了原料成分的推荐指标(表1),为根据纤维用途选择矿石原料以及按原料具体成分调整拉丝工艺提供了最

表 1 玄武岩石粉主要化学成分及推荐值

 $w_B/\%$

Table 1 Major composition and recommended value of basalt powder

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	TiO ₂	总量	M _k
SS	47.172	14.17	12.2	9.439	6.335	5.294	2.975	97.585	3.889
BR	46.423	13.46	12.5	9.748	9.053	4.614	2.680	98.478	3.185
RY	50.502	14.58	12.9	8.069	7.026	3.610	1.944	98.631	4.311
MAC	51.626	14.72	12.5	8.425	6.073	3.905	1.842	99.091	4.576
MTC	53.939	14.03	11.9	8.434	5.722	3.604	1.658	99.287	4.801
FL	52.841	14.15	11.6	7.792	5.657	4.352	2.004	98.396	4.981
BC	47.722	14.38	12.5	8.816	7.731	3.980	2.072	97.201	3.753
HX	50.658	13.28	11.6	8.359	8.176	4.195	2.051	98.319	3.867
推荐值(OSNOS等, 2005)	45~60	12~19	7~18	6~15	3~7	2.5~6	0.9~2		4.2~6.5

直接的技术支持。石粉样品的化学成分及酸度系数见表1。结果表明,多文组(Qp²d)样品的化学成分均处于或接近推荐区间,MAC与MTC样品的各项指标均处于推荐区间。

2.2 矿物组分特征

除化学成分外,纤维用玄武岩还对矿物组分有

着一定要求,主要是为避免高熔点或含水矿物可能造成的不利影响(汪溢汀等, 2020)。样品矿物组分及含量见图2和表2。

可发现MAC与MTC样品主要矿物为斜长石、辉石,副矿物为钛铁矿,不含高熔点或含水矿物。通过样品化学成分及矿物组分可初步筛选出MAC和

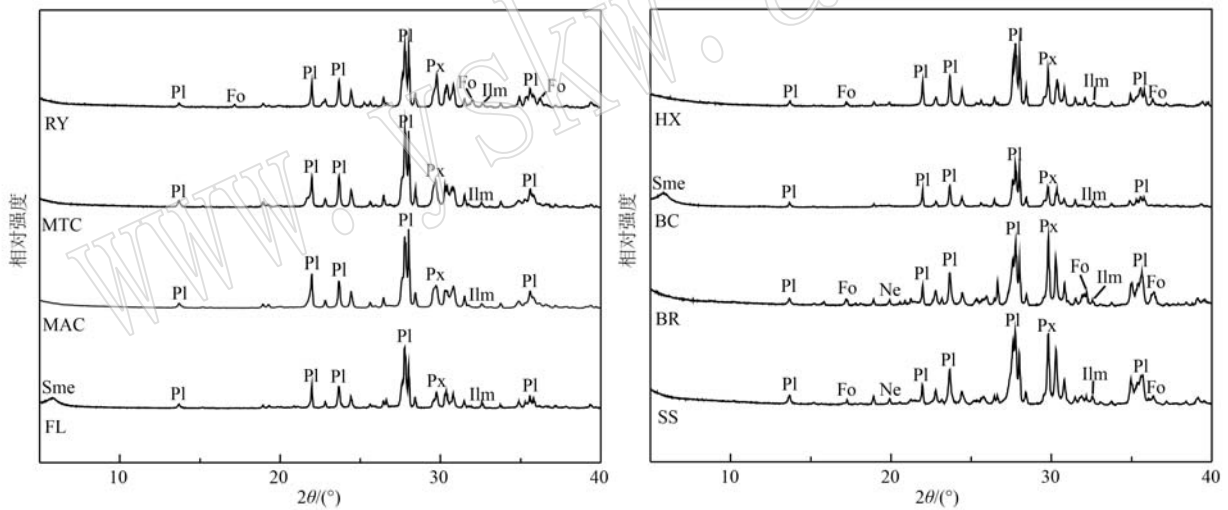


图 2 玄武岩石粉的 XRD 谱图

Fig. 2 XRD diffraction patterns of basalt powder

Pl—斜长石; Px—辉石; Ilm—钛铁矿; Fo—镁橄榄石; Ne—霞石; Sme—蒙皂石

Pl—plagioclase; Px—pyroxene; Ilm—ilmenite; Fo—forsterite; Ne—nepheline; Sme—smectite

表 2 玄武岩石粉矿物组分及含量 $w_B/\%$

Table 2 Mineral composition and content of basalt powder

样品	斜长石	辉石	钛铁矿	镁橄榄石	蒙皂石	霞石
SS	47.3	44.7	1.1	3.5	-	3.4
BR	58.6	29.7	1.3	6.5	-	3.9
RY	76.6	17.5	0.9	5.0	-	-
MAC	88.9	10.4	0.7	-	-	-
MTC	86.1	13.1	0.8	-	-	-
FL	84.5	9.5	1.7	-	4.3	-
BC	75.9	14.9	1.8	-	7.4	-
HX	75.8	18.5	0.9	4.8	-	-

MTC 样品较适合拉制纤维。

2.3 结晶性能特征

玻璃结晶是指在一定条件下玻璃共混体系释放能量向晶体转化且最终析出晶体的现象,该现象会导致产品的外观以及质量上产生一定的缺陷(耿铁等, 2017)。玄武岩纤维以玄武岩玻璃的形态存在(霍泳霖, 2022),在原料的筛选过程中要充分考虑到原料结晶能力,尽量防止发生结晶现象,避免对纤维制备以及纤维性能产生不利影响。

将 MAC 和 MTC 样品通过高温熔融实验制成玄武岩玻璃,可见 MAC 样品熔制的玻璃体表面较光洁,MTC 样品制得玻璃体表面存在气孔等瑕疵(图 3)。

使用 SEM 观察玻璃体表面形貌(图 4),并通过 EDS 分析得出 MAC 样品表面晶体成分(摩尔分数)为 SiO_2 (43.25%)、 MgO (13.09%)、 Al_2O_3 (8.37%)、 CaO (20.81%)、 $^{\text{T}}\text{FeO}$ (9.73%)、 Na_2O (4.75%); MTC 样品表面晶体成分为(摩尔分数) SiO_2 (47.21%)、

MgO (9.46%)、 Al_2O_3 (9.17%)、 CaO (22.79%)、 $^{\text{T}}\text{FeO}$ (5.70%)、 Na_2O (5.68%)。二者均属于辉石相矿物。

对玄武岩玻璃样品进行 XRD 分析(图 5),可发现 MAC 样品制得的玻璃体结晶出辉石(84.1%,质量分数)、尖晶石(2.2%)、磁铁矿(9.0%)、方石英(1.7%)、赤铁矿(2.9%);MTC 样品制得的玻璃体结晶现象更加复杂,为辉石(47.6%)、尖晶石(2.9%)、磁铁矿(7.6%)、方石英(8.6%)、赤铁矿(2.0%)、钙长石(28.7%)、钙铁榴石(2.6%)。

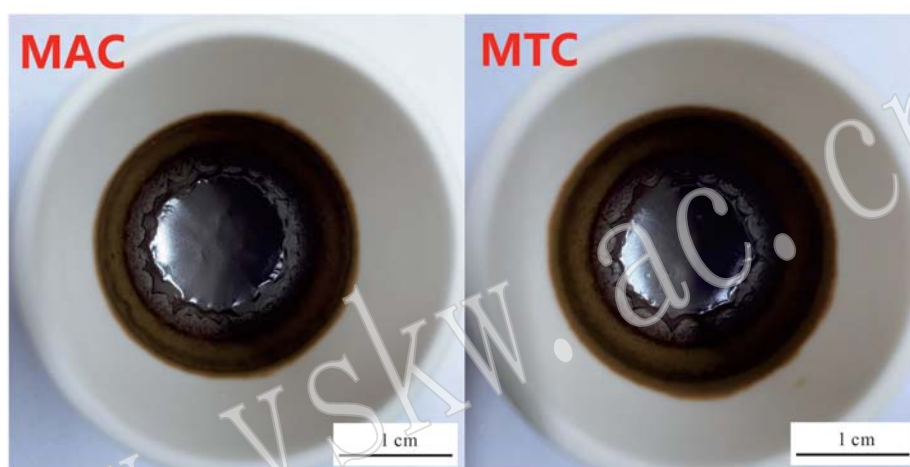


图 3 1400℃条件下 MAC 和 MTC 石粉熔制玻璃体(随炉冷却)

Fig. 3 Basalt glass prepared from MAC and MTC powder at 1400℃ (cooling with furnace)

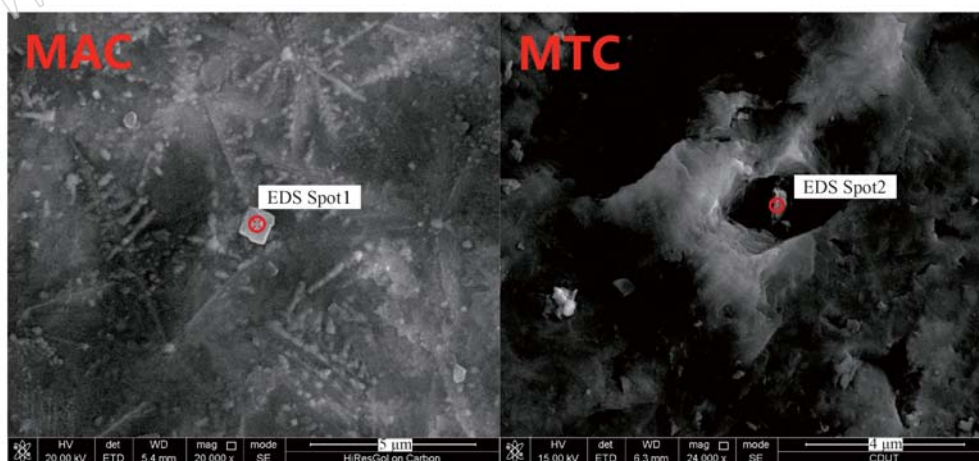


图 4 MAC 和 MTC 样品熔制玻璃体表面形貌及析出晶体

Fig. 4 Surface morphology and crystals of basalt glass prepared from MAC and MTC powder

使用 DSC 手段检测 MAC 和 MTC 石粉在升温过程中的能量变化(图 6)。结果显示,两件样品的能量变化过程较接近,40~70℃时的吸热谷为脱去吸附

水的过程,1000~1200℃的吸热谷为熔体中矿物的部分熔融过程,1300~1360℃的吸热谷为样品的完全熔融过程。

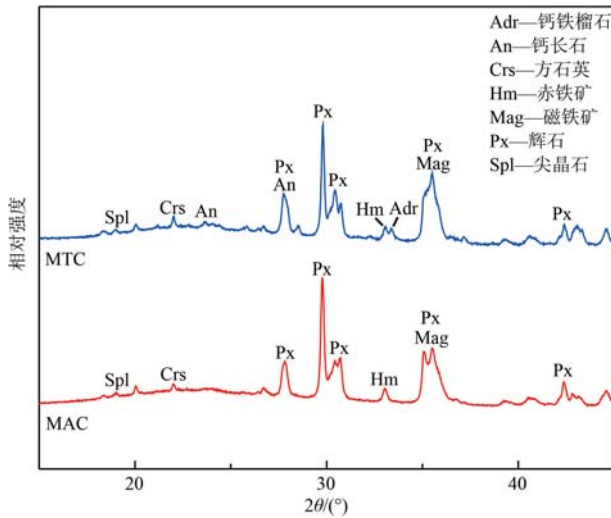


图5 MAC和MTC石粉熔制玻璃体的XRD衍射图
Fig. 5 XRD diffraction patterns of basalt glass prepared from MAC and MTC powder

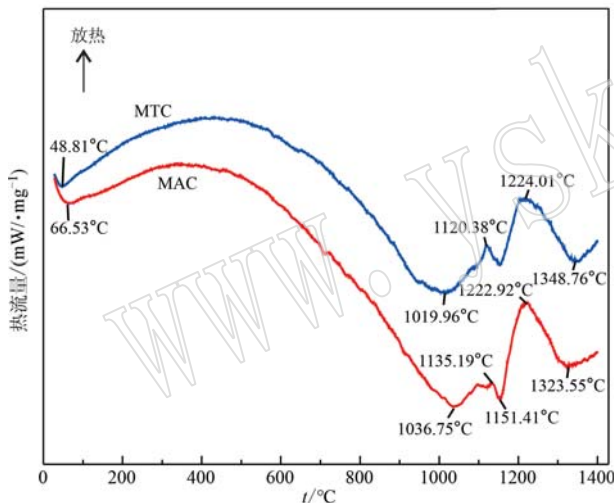


图6 MAC和MTC石粉的DSC曲线
Fig. 6 DSC curves of MAC and MTC powder

玻璃的稳定性可以基于玻璃的特征温度来判断,并可在一定程度上反映玻璃结晶的难易程度(杨秋红等, 1994)。通常使用 ΔT (K)与 H' 两个参数来表征玻璃的稳定性。其中, ΔT 为玻璃的结晶起始温度 T_x (K)与玻璃的转变温度 T_g (K)的差值;权重参数 $H' = (T_x - T_g) / T_g$ 。当 ΔT 与 H' 值越大时,反映玻璃的稳定性越好(王艺慈等, 2014)。通过图6中信息,可计算得出MAC样品的 $\Delta T = 445.37$ K, $H' = 0.624$; MTC样品的 $\Delta T = 400.74$ K, $H' = 0.526$ 。说明MAC样品制得的玄武岩玻璃稳定性更好,更不容易发生结晶现象,该计算结果也与XRD结果相符。故最终确定使用MAC石粉进行拉丝实验。

3 拉丝实验及结果

3.1 实验步骤

玄武岩石粉废渣拉丝实验于营口建科玄武岩纤维研究所完成。利用SYN-T型无机非金属连续单丝控制实验台,采用单孔铂铑合金坩埚法进行,使用水溶性环氧树脂增强型浸润剂。纤维制备采用两步法:将200目MAC石粉经除铁处理后从室温经3 h升温至1500℃并保温3 h后出料,得到表面较光洁的黑色半透明玻璃体;将破碎后的玻璃熔料放进实验炉,从室温经4.5 h升温至1450℃后开始拉丝实验,出丝速度为500 m/min。

3.2 测试方法

纤维性能检测于营口建科玄武岩纤维研究所产品质量检验中心完成。

纤维结晶相分析于成都理工大学地球科学学院X射线粉晶衍射实验室完成,将纤维研磨至200目粉末后使用。仪器型号为Bruker D8 ADVANCE型X射线衍射仪,测试条件为工作电压40 kV,工作电流40 mA,扫描范围 $10^\circ \sim 45^\circ$,扫描时间15.0 s,使用2.0 mm固定狭缝。

纤维表面形貌观察于成都理工大学地球科学学院扫描电镜实验室完成。仪器型号为FEI Nova NanoSEM 450型场发射扫描电子显微镜。

3.3 结果与讨论

1450℃条件下拉丝过程中多次出现断丝现象,无法连续出丝,推测可能是熔融温度偏低导致结晶现象发生,使得纤维结构出现缺陷所导致。将温度升至1480℃并保温1 h后再次拉丝,该次出丝连续性较好,连续60 min以上无断头现象。

MAC石粉在1480℃条件下成功制备连续玄武岩纤维,其外观为褐绿色,表面呈丝绢光泽(图7),单丝直径7.8 μm ,断裂强度为0.45 N/tex。

将制得纤维与营口建科玄武岩纤维研究所产品质量检验中心提供的标准玄武岩纤维以及其他文献资料中纤维样品的性能进行对比(表3)。结果表明,本次制得连续纤维所有检测项目的变异系数均在标准范围之内,但断裂强度的测定值略低。本次拉丝样品仍需进行后续研究来提升纤维的力学性能,以达到市场标准。

为探究1450℃条件下纤维频繁断丝与1480℃条件下制得纤维力学性能较低是否与结晶现象的发



图7 MAC石粉制得的连续纤维

Fig. 7 Continuous fiber prepared from MAC powder

生有关,使用SEM观察纤维表面形貌,通过XRD检测纤维是否包含晶体成分。

SEM结果显示,1450℃条件下制得纤维表面存在大量树枝状及针状晶体(图8a、8b),推测这可能是导致纤维频繁断丝的直接原因。1480℃条件下制得纤维表面未观察到明显结晶现象,但纤维表面凹凸不平且存在大量附着物(图8c、8d),推测这可能是导致纤维断裂强度略低的原因。

XRD结果显示,1450℃条件下制得的纤维结晶出硅灰石、石英、黄长石和磁铁矿,而1480℃条件下制得的纤维检测出黄长石和磁铁矿(图9)。

造成该差异的原因是在玻璃的结晶过程中,晶体通常是从成分差异大、有缺陷的地方开始形成

表3 1480℃条件下制得的纤维与其他玄武岩纤维的性能对比

Table 3 Comparison of the performance of the fiber prepared at 1480℃ with other basalt fibers

样品		检测项目		
		纤维直径/ μm	断裂强力/ $\text{N} \cdot \text{tex}^{-1}$	断裂伸长率/%
MAC石粉制得纤维(本文)	测定值	7.8	0.45	2.8
	变异系数(%)	4.9	5.6	1.9
标准纤维	测定值	5.5	0.58	3.1
	变异系数(%)	3~8	5~20	1.5~3
玄武岩纤维(Novotná等, 2016)	平均值	13	0.804	-
玄武岩纤维(Gao et al., 2017)	测定值	13	0.407	-
玄武岩纤维(Xing et al., 2019)	测定值	12.7±0.9	0.51±0.14	-
	测定值	12.2±0.7	0.56±0.12	-
	测定值	13.0±2.6	0.64±0.11	-
	测定值	12.8±2.2	0.64±0.10	-
	测定值	12.6±0.9	0.66±0.10	-
	测定值	13.0±0.7	0.68±0.12	-
	测定值	12.2±0.8	0.73±0.09	-

晶核并长大,较低的熔融温度会使得玻璃体的成分起伏较大。当熔融温度越高时,成分就均化的越充分,玻璃体中的化学成分组成趋向一致,故结晶现象越不容易发生(杨娟等, 2007)。

在纤维制备过程中提升熔融温度并适当延长保温时间,可使熔体中的硅灰石与石英晶体完全熔融,熔体成分更加均匀。所以1450℃条件下制得的纤维表面存在大量晶体并频繁断丝;而1480℃条件下没有结晶出硅灰石与石英,并成功制得连续纤维。

另外,当原料中铁的氧化物含量较高时会降低熔体的透热性,加剧熔体温度的不均匀,并会使熔体结晶温度更接近熔点,更容易出现结晶现象(刘忠, 2022; 霍泳霖等, 2022)。由于1480℃条件下制得的纤维结晶出的磁铁矿为铁的氧化物,黄长石中也

会因为类质同像替代而存在铁,故推测是样品中含量较高的铁导致了结晶的发生。

4 结论与展望

(1) 海南岛多文组(Qp²d)玄武岩石粉样品的化学成分较满足推荐指标,美鳌村(MAC)与美台村(MTC)样品具有制备连续玄武岩纤维的潜力。

(2) 美鳌村样品(MAC)制得的玻璃体主要结晶出辉石,美台村样品(MTC)制得的玻璃体结晶现象更加复杂,主要为辉石和钙长石。美鳌村样品更适合进行纤维制备实验。

(3) 美鳌村样品(MAC)在1450℃条件下制备纤维时频繁断丝,且纤维表面结晶出大量树枝状及

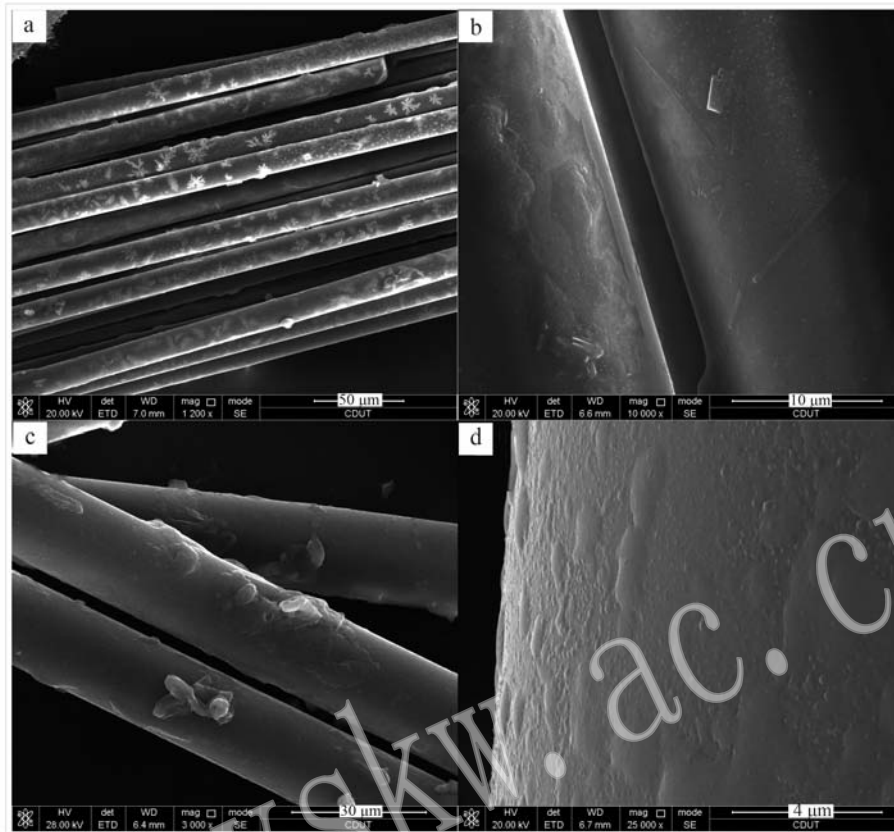


图 8 制得的纤维表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of fibers

a, b—1 450°C 条件下制得的纤维; c, d—1 480°C 条件下制得的纤维

a, b—fiber prepared at 1 450°C; c, d—fiber prepared at 1 480°C

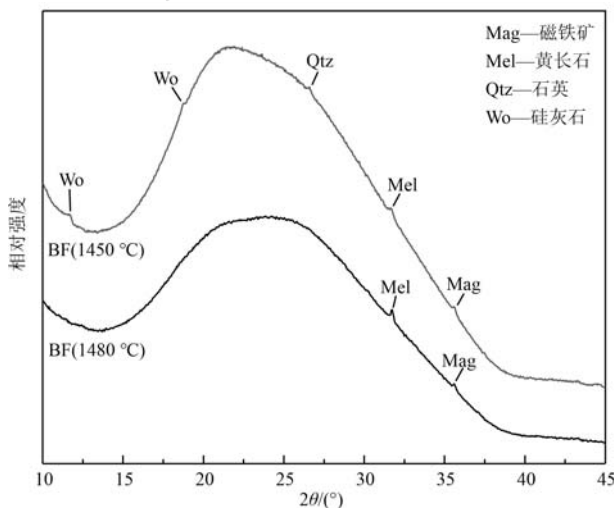


图 9 制得纤维的 XRD 衍射图

Fig. 9 XRD diffraction patterns of fibers

针状的硅灰石、石英、黄长石和磁铁矿;在 1 480°C 条件下成功制得连续纤维,纤维表面未观察到明显结

晶现象,但表面凹凸不平且存在大量附着物,仍检测出含有黄长石和磁铁矿,且纤维断裂强力值略低。

(4) 制备工艺方面,提升纤维的制备温度并适当延长保温时间可减少结晶现象发生;原料成分方面,玄武岩石粉中较高的铁含量可能导致纤维制备时发生结晶。

研究表明,利用海南岛玄武岩石粉废渣制备连续纤维是可行的,但仍存在纤维断裂强力值较低的问题需要改进。后续研究的重点工作就是要通过改良原料配比、改善制备工艺等手段避免结晶现象发生,从而提升纤维的力学性能。

References

- Chen Xingfen. 2018. Study on the High Strength and Performance of Continuous Basalt Fiber[D]. Nanjing: Southeast University (in Chinese with English abstract).

- Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, *et al.* 2004. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 533~544 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y Q, Jia C, Meng L, *et al.* 2017. Heat resistance study of basalt fiber material via mechanical tests[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 283(1): 012016 (7pp).
- Geng Tie, Sheng Jie, Wei Chuanle, *et al.* 2017. Research on crystallization temperature of glass and its overview[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 36(11): 3 672~3 675 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenguo, Cai Fuxiang, Han Zhongyuan, *et al.* 1993. Quaternary Volcano of Hainan Island and Leizhou Peninsula[M]. Beijing: Science Press, 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Huo Yonglin. 2022. Study on Crystallization Properties of Basalt Glass [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Huo Yonglin, Huo Jichuan, Zhang Xingquan, *et al.* 2022. Development and utilization of basalt[J]. *Materials Reports*, 36(6): 113~123 (in Chinese with English abstract).
- Li Sunxiong, Yun Ping, Lin Yihua, *et al.* 2017. Regional Geology of China-Hainan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 487~496 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Chu F L, Tuo W Y, *et al.* 2021. Review of research on basalt fibers and basalt fiber-reinforced composites in China (I): Physicochemical and mechanical properties[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9): 1 612~1 624.
- Liu Changjiang, Tong Xiaocong, Liu Zhong, *et al.* 2020. Analysis of basalt fiber raw material characteristics[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 39(12): 3 858~3 865 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianqiang and Ren Zhongyuan. 2013. Diversity of source lithology and its identification for basalts: A case study of the Hainan basalts[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(3): 471~488 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhong. 2022. Effect of Raw Material Pretreatment on Basalt Fiber Formation and Properties[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University (in Chinese with English abstract).
- Mei Shengwang. 2018. The Petrogenesis and Geodynamic Mechanism of Late Cenozoic Basalts in North Hainan Island [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science (in Chinese with English abstract).
- Meng Y, Liu J X, Xia Y, *et al.* 2021. Preparation and characterization of continuous basalt fibre with high tensile strength[J]. *Ceramics International*, 47: 12 410~12 415.
- Novotná M and Chen Yuwei. 2016. Comparison properties of selected inorganic fibers[J]. *Melliand China*, 44(2): 14~16 (in Chinese with English abstract).
- Song Ping, Gao Huan, Wang Ling, *et al.* 2022. Basic characteristics and application prospect analysis of basalt fiber[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(4): 173~178 (in Chinese with English abstract).
- Wang X C, Li Z X, Li X H, *et al.* 2012. Temperature, pressure, and composition of the mantle source region of Late Cenozoic basalts in Hainan Island, SE Asia: A consequence of a young thermal mantle plume close to subduction zones? [J]. *Journal of Petrology*, 53(1): 177~233.
- Wang Yici, Yu Wenwu, Zhang Jianliang, *et al.* 2014. Crystallization kinetics and microstructure of glass-ceramics prepared from Baotou steel blast furnace slag[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 35(1): 88~93 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yiting, Bai Zhimin, Yu Sibin, *et al.* 2020. Effect of mineral composition and structural of basalt on preparation process and properties of basalt fibers[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, (1): 23~29 (in Chinese with English abstract).
- Wei Bin. 2011. Study on the Coating Modification of Basalt Fibers and their Chemical Stability Performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Xing D, Xi X Y and Ma P C. 2019. Factors governing the tensile strength of basalt fibre[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 119: 127~133.
- Yang Juan, Du Yongguo, Li Xiaodong, *et al.* 2007. The influence factors of the crystal separating of MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass ceramics[J]. *Journal of Materials Engineering*, (10): 42~44 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qihong and Jiang Zhonghong. 1994. The study of criterion for glass crystallization kinetics[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 22(5): 419~426 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈兴芬. 2018. 连续玄武岩纤维的高强度化研究[D]. 南京: 东南大学.
- 樊祺诚, 孙 谦, 李 霓, 等. 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. *岩石学报*, 20(3): 533~544.
- 耿 铁, 盛 洁, 蔚川乐, 等. 2017. 玻璃结晶温度及其研究概述

- [J]. 硅酸盐通报, 36(11): 3 672~3 675.
- 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 等. 1993. 雷琼第四纪火山[M]. 北京: 科学出版社, 1~7.
- 霍泳霖. 2022. 玄武岩玻璃结晶性能的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学.
- 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): 113~123.
- 李孙雄, 云平, 林义华, 等. 2017. 中国区域地质志——海南志[M]. 北京: 地质出版社, 487~496.
- 刘忠. 2022. 原料预处理对玄武岩成纤及纤维性能的影响[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 刘昶江, 全晓聪, 刘忠, 等. 2020. 玄武岩纤维原料特征分析[J]. 硅酸盐通报, 39(12): 3 858~3 865.
- 刘建强, 任钟元. 2013. 玄武岩源区母岩的多样性和识别特征——以海南岛玄武岩为例[J]. 大地构造与成矿学, 37(3): 471~488.
- 梅盛旺. 2018. 海南岛北部晚新生代玄武岩岩石学成因及其地球动力学机制[D]. 石家庄: 河北地质大学.
- Novotná M, 陈玉伟. 2016. 几种无机纤维的性能对比[J]. 国际纺织导报, 44(2): 14~16.
- OSNOS S P, 李中鄂, 张德福. 2005. 用玄武岩矿石制造连续纤维的方法[P]. 广东省: CN1566005A.
- 宋平, 高欢, 汪灵, 等. 2022. 玄武岩纤维基本特征及应用前景分析[J]. 矿产保护与利用, 42(4): 173~178.
- 王艺慈, 于文武, 张建良, 等. 2014. 包钢高炉渣微晶玻璃的结晶动力学及显微结构分析[J]. 材料热处理学报, 35(1): 88~93.
- 汪溢汀, 白志民, 余思彬, 等. 2020. 原料物相和组构对玄武岩纤维制备工艺与性能的影响[J]. 中国非金属矿工业导刊, (1): 23~29.
- 魏斌. 2011. 玄武岩纤维的化学稳定性能及其涂层改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- 杨娟, 堵永国, 李效东, 等. 2007. MgO-Al₂O₃-SiO₂ 微晶玻璃结晶影响因素[J]. 材料工程, (10): 42~44.
- 杨秋红, 姜中宏. 1994. 玻璃结晶动力学判据研究[J]. 硅酸盐学报, 22(5): 419~426.