

酸沥滤和热处理对 $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ 系统高硅氧玻璃纤维结构的影响刘郑威^{1,2}, 张帅明^{1,2}, 罗理达^{1,2}, 汪庆卫^{1,2,3}, 蒋伟忠^{1,2}, 赵 祥³(1. 东华大学纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620; 2. 先进玻璃制造技术教育部工程研究中心, 上海 201620;
3. 临沂昊泉硅业科技有限公司, 山东 临沂 276003)

摘 要: 高硅氧玻璃纤维应用广泛、性能优异。目前制备高硅氧特种玻璃纤维的主要方法是酸沥滤。酸沥滤法是将玻璃纤维原纱通过酸沥滤, 热处理等工艺制备得到高硅氧玻璃纤维。采用 Raman 光谱研究 $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ 二元系玻纤在酸沥滤、热处理工艺制备高硅氧玻璃纤维过程中的纤维结构变化。结果表明: 酸沥滤过程使硅氧四面体的弯曲振动峰和不对称伸缩振动峰向低波数偏移, 且峰强变弱, 主要由于酸沥滤过程提高了纤维的 SiO_2 含量并改变了内部结构。热处理后, 纤维 Raman 光谱的不对称伸缩振动峰消失, 出现缺陷谱线 D_1 和 D_2 , 且不同热处理温度后纤维的致密度不同, 主要是由于热处理过程中纤维发生的缩合反应导致的。

关键词: Raman 光谱; 高硅氧玻璃纤维; 酸沥滤; 热处理

中图分类号: TQ171.77 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)04-0937-06

网络出版时间: 2022-03-21

Effects of Acid Leaching and Heat Treatment on Structure of $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ Glass FibersLIU Zhengwei^{1,2}, ZHANG Shuaiming^{1,2}, LUO Lida^{1,2}, WANG Qingwei^{1,2,3}, JIANG Weizhong^{1,2}, ZHAO Xiang³(1. State Key Laboratory for Modification of chemical Fibers and Polymer Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Engineering Center of Advanced Glass Manufacturing Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Linyi Haoquan Silicon Industry Technology Co.Ltd, Linyi 276003, Shandong, China)

Abstract: High silica glass fiber is widely used and has the superior properties. Acid leaching is the main existing method to prepare high silica special glass fiber. In this paper, high silica glass fiber was prepared via acid leaching and heat treatment. The structure of $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ binary glass fiber during acid leaching and heat treatment was investigated by Raman spectroscopy. The results show that the bending vibration peak and asymmetric stretching vibration peak shift to a lower wavenumber, and the peak intensity becomes weaker during acid leaching process, mainly because SiO_2 content in the fiber increases and the internal structure of the fiber changes to a chain structure. After heat treatment, the asymmetric stretching vibration peaks disappear, and the defect lines D_1 and D_2 appear, and the density of fibers changes at different heat treatment temperatures, mainly due to the condensation reaction of fiber during heat treatment.

Keywords: Raman spectroscopy; high silica glass fiber; acid leaching; heat treatment

高硅氧玻璃纤维是 SiO_2 含量在 95% 以上的一种特种玻璃纤维^[1], 具有非常优异的耐高温性能, 可在 900 °C 下长期工作, 在 1 200 °C 短期工作。被广泛的应用于国防、宇航、黑色及有色金属熔体净化过滤等诸多领域^[2]。生产高硅氧玻璃纤维主要的生产方法有酸沥滤法和溶胶凝胶法^[3]。溶胶凝胶法的

生产技术较为复杂, 因此没有得到大规模应用, 酸沥滤法是目前最主要的生产高硅氧玻璃纤维的方法。

酸沥滤法是将玻璃纤维原纱通过酸沥滤, 热处理等工艺制备得到高硅氧玻璃纤维。酸沥滤是指在酸溶液的作用下纤维中的非硅氧化物被沥滤出来, 纤维中二氧化硅含量大大提升, 纤维呈连续的富二

收稿日期: 2021-12-06。 修订日期: 2021-12-28。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51873032); 山东省重点研发计划(2019JZZY010308)。

第一作者: 刘郑威(1997—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 汪庆卫(1978—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-12-06. Revised date: 2021-12-28.

First author: LIU Zhengwei (1997—), male, Master candidate.

E-mail: zhengwei7539510@qq.com

Correspondent author: WANG Qingwei (1978—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wqwq888@dhru.edu.cn

氧化硅骨架状。热处理是指通过烧结使酸沥滤后原本疏松的纤维变得紧密,从而提高纤维的强度。酸沥滤和热处理都会对纤维的结构产生影响,从而影响纤维的力学性能。祖群等^[4]研究了不同的酸沥滤、水洗和烧结工艺,研究表明酸沥滤后纤维呈封闭的多孔结构,且纤维的强度随热处理温度的提高而提高。目前关于高硅氧玻璃纤维制备中的酸沥滤和热处理工艺的研究已有较多研究成果,但对于酸沥滤和热处理过程中 $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ 玻璃纤维的化学结构变化尚需进一步的研究。

Mysen^[5]和 Mcmillan^[6]等根据硅酸盐玻璃的硅氧四面体结构中桥氧数目不同,把网络体的基本单元分为 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 ,即分别为单体、二聚体、链状结构、层状结构、网络状结构。常规的硅酸盐玻璃的 Raman 光谱主要有 2 个振动带,分别为 $800\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 处的对称伸缩振动带和 $500\sim 600\text{ cm}^{-1}$ 处的弯曲振动带^[7]。尤静林等^[8]采用了 Raman 光谱和核磁共振谱对不同 Na_2O 浓度的二元硅酸盐玻璃进行了测定,通过 Raman 光谱定量方法有效地解析了硅酸盐玻璃结构,研究得到了不同精细结构的相对含量以及初级结构 Q_i 的相对含量。熊义等^[9]运用 Raman 光谱技术研究了 Na_2O (K_2O)– CaO (MgO)– SiO_2 等 5 个系统的玻璃,结果表明阳离子对玻璃近程结构的改造会引起 Raman 特征的变化。

目前已有的研究主要针对于钠硅酸盐玻璃的化学组成和化学结构,但是对于钠硅酸盐玻璃纤维在高硅氧玻璃纤维制备工艺中,纤维的结构演变研究仍然不充分。了解钠硅酸盐玻璃在酸处理和热处理中的结构变化有助于进一步理解硅酸盐玻璃的结构和特点。

利用 Raman 光谱研究了 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 质量分数比为 8:2 的二元钠硅酸盐玻璃纤维在酸沥滤前后和热处理前后的化学结构变化,通过分析 Raman 光谱比较硅酸盐玻璃结构网络中的结构单元变化,进一步研究二元钠硅酸盐玻璃纤维的酸沥滤和热处理机理。

1 实验

1.1 $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ 二元系玻璃纤维制备

所用原料 SiO_2 、 Na_2O 和 Al_2O_3 均为分析纯,由国药集团化学试剂有限公司生产。按 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 质量分数比为 8:2 的比例,加入 1% (质量分数) Al_2O_3 作为添加剂来配制配合料,有助于防止分相并提高纤维强度^[4]。将混合均匀后在 $1\,550\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下熔制

成玻璃碎块,加入到铂铑坩埚单丝炉中,在 $1\,280\sim 1\,320\text{ }^\circ\text{C}$ 拉制成纤维,得到初始玻璃纤维,并对纤维进行 Raman 光谱分析,纤维直径为 $(8.55\pm 0.30)\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.2 对玻璃纤维原丝进行酸沥滤

将纤维原丝在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干 12 h,取适量纤维原丝放入聚丙烯(PP)烧杯中,加入 250 mL 浓度为 3 mol/L 的盐酸。将烧杯置于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中,并用塑料薄膜将烧杯口密封,防止盐酸的挥发。纤维在烘箱中的反应时间分别为 1、2、4、8 h。在到达一定的反应时间后取出塑料烧杯,将烧杯中的纤维样品用去离子水洗净,在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥 12 h 后。

1.3 对酸沥滤后的玻璃纤维进行热处理

热处理所用的玻璃纤维是由 $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ 二元系玻璃纤维原丝在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、3 mol/L 的盐酸溶液中酸沥滤 12 h 后得到的,酸沥滤后的纤维在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥 12 h。取适量纤维放入坩埚中,随后将坩埚放入马弗炉。热处理的温度分别设置为 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\text{ }^\circ\text{C}$,升温速度为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,保温 35 min。保温结束后,纤维随炉降温至室温,然后将纤维样品取出。

1.4 测试

用英国 Renishaw 公司的激光显微 Raman 光谱仪(inVia Reflex 型)分析纤维结构,选用波长为 633 nm 的紫外激光,扫描波束范围为 $200\sim 1\,500\text{ cm}^{-1}$ 。用 PANalytical 公司的 Axios 型 X 射线荧光光谱仪分析纤维化学组成。

2 结果与讨论

2.1 酸沥滤对纤维结构的影响

$\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}$ 二元系初始玻璃纤维由 80% (质量分数,下同)的 SiO_2 , 20%的 Na_2O 以及外加 1%的 Al_2O_3 组成^[10]。 Na_2O 属于碱金属氧化物,在玻璃中作为网络外体氧化物,不能参与网络的形成,一般处于网络之外。碱金属氧化物的加入会使玻璃网络结构中硅氧四面体的连接断裂,产生非桥氧。初始玻璃纤维在酸沥滤不同时间后的 Raman 光谱如图 1 所示。由 Raman 光谱可以看出,初始纤维在 $400\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,000\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 2 处呈现了包络线状的谱峰。 $1\,000\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 处的谱峰来源于硅氧四面体中 Si--O--Si 键的不对称伸缩振动,而 $400\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 处的谱峰来源于硅氧四面体中桥氧的弯曲振动,这主要反映了桥氧的键长与键角的变化。王晨阳^[11]采用了 Raman 光谱研究不同配比的钠硅酸盐玻璃,研

究发现 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 二元系玻璃的硅酸盐分子网络基本结构单元, 即单体 Q_0 、二聚体 Q_1 、链状 Q_2 、层状 Q_3 、架状 Q_4 , 所对应的峰的位置分别在 850 cm^{-1} 、 $900\sim 920\text{ cm}^{-1}$ 、 $950\sim 1\,000\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,050\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 附近, 而网络状结构 Q_4 中由于不存在非桥氧, 因此无法得到其特征峰。初始纤维的 Raman 光谱显示, 在波数为 $1\,097\text{ cm}^{-1}$ 附近纤维有强特征峰, 这主要是由于 Na^+ 的原子半径较大, 不易嵌入硅酸盐团簇结构中, 属于变网离子, 可以直接破坏硅酸盐玻璃结构中的桥氧键, 使其变为非桥氧。

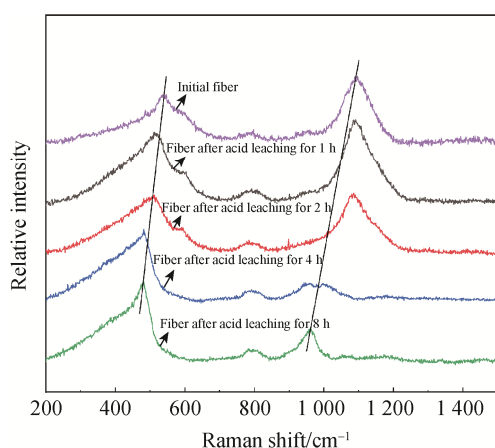


图 1 酸沥滤不同时间纤维的 Raman 谱($90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 mol/L)
Fig. 1 Raman spectra of acid leached fibers at different time ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 mol/L)

酸沥滤过程本质上是离子交换的过程。纤维原丝浸泡在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、浓度为 3 mol/L 的盐酸中, 纤维中的 Na^+ 与酸中的 H^+ 发生交换。由图 1 中不同酸沥滤时间纤维的 Raman 光谱可以看出, 随着酸沥滤反应的进行, 硅酸盐分子网络结构中的非桥氧所对应的对称伸缩振动峰逐渐向低波数方向移动, 并且振动峰的相对强度有降低的趋势, 结构单元中桥氧的弯曲振动峰也向低波数方向移动, 但相对强度升高。

酸沥滤不同时间后纤维中不对称伸缩振动峰和弯曲振动峰向低波数偏移幅度如图 2 所示。酸沥滤前 2 h, 特征峰的偏移幅度较小, 分别在 40 cm^{-1} 和 10 cm^{-1} 左右, 主要是由于酸沥滤时间较短, 离子交换程度较低。酸沥滤 4 h 后, 不对称伸缩振动峰从初始的 $1\,097\text{ cm}^{-1}$ 处移动到了 998 cm^{-1} 处, 当酸沥滤 8 h 后, 不对称伸缩振动峰偏移到了 959 cm^{-1} 处, 弯曲振动峰从 511 cm^{-1} 位移到了 482 cm^{-1} 。这主要是由于随着酸沥滤反应的进行, Na^+ 和 H^+ 的交换程度逐渐加深, 纤维中的 SiO_2 含量逐渐增加, Na^+ 的减少使断网作用减弱。王志超和 You 等^[12-13]研究表明

二元碱金属硅酸盐玻璃中 SiO_2 含量的增加, 导致 Si-O-Si 的键角增大, 从而使弯曲振动频率向低波数偏移。

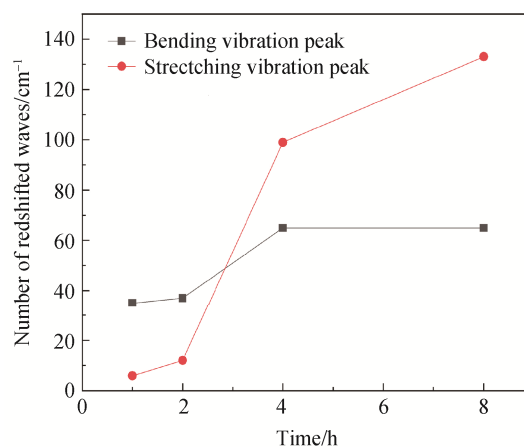


图 2 酸沥滤不同时间 Raman 光谱(归一化)特征峰向低波数偏移幅度

Fig. 2 Raman spectra (normalized) characteristic peak shift to low wave number at different time of acid leaching

酸沥滤不同时间后纤维中桥氧和非桥氧特征峰的峰强变化如图 3 所示。由图 3 可以看出, 不对称伸缩振动峰在酸沥滤 1、2 h 和 4 h 后峰强有所降低, 这是由于不对称伸缩振动峰所对应的层状结构随着酸沥滤离子交换反应的进行而逐渐减少。当酸沥滤进行到 8 h 时, 不对称伸缩振动峰所对应的结构为链状结构, 并且振动峰的峰强提高, 说明了纤维中层状结构大量减少, 链状结构增多。

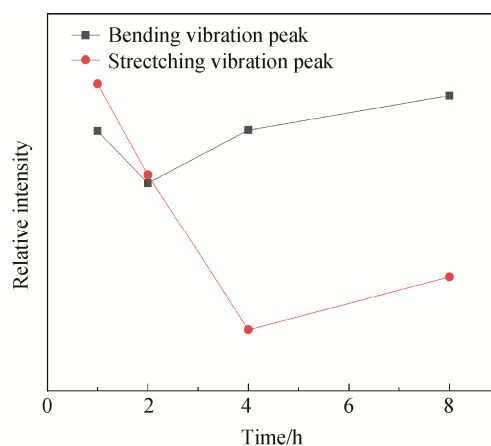


图 3 酸沥滤不同时间 Raman 光谱(归一化后)特征峰强度
Fig. 3 Absorption peak intensity of Raman spectra (after normalization) at different time of acid leaching

酸沥滤 8 h 后纤维样品 XRF 测试结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 酸沥滤后的纤维中 SiO_2 含量为 97.1%, 原始纤维中的 Na_2O 基本被沥出, 符合高硅氧玻璃纤维中 SiO_2 含量的要求。

表 1 酸沥滤后 8 h 后纤维 XRF 测试
Table 1 XRF test of fiber after acid leaching

Composition	Mass fraction/%
SiO ₂	97.1
Al ₂ O ₃	2.3
Others	0.6

2.2 热处理对纤维结构的影响

图 4 为酸沥滤后纤维在 600 °C 热处理前后的 Raman 光谱。由图 4 可见, 热处理后的纤维较热处理前发生了明显变化。热处理前位于 965 cm⁻¹ 处的不对称伸缩振动峰消失, 而热处理后纤维在 600 cm⁻¹ 处出现了新的桥氧的弯曲振动峰。Pasquarello^[14]等通过分析分子动力学获得的模型结构, 研究了石英玻璃中环结构的 Raman 缺陷谱线识别, 研究发现石英玻璃的三元环和四元环模型投影分别在 609 cm⁻¹ 和 497 cm⁻¹ 处出峰, 这与实际测得的四元环缺陷谱线 D₁ 处于 495 cm⁻¹ 及三元环缺陷谱线 D₂ 处于 600 cm⁻¹ 保持一致。Damien^[15]等的研究也印证了这一点, 他们对石英玻璃的 Raman 光谱进行了研究, 发现 486 cm⁻¹ 处的缺陷 D₁ 与 600 cm⁻¹ 处的缺陷 D₂ 分别归因于四元环和三元环的 Raman 活性模式。由图 4 可以看出, 经过热处理后, 纤维中硅酸盐分子网络的链状结构数量大大减少, 主要变为架状结构, 非桥氧的数量也大大减少, 而桥氧的数量增多。

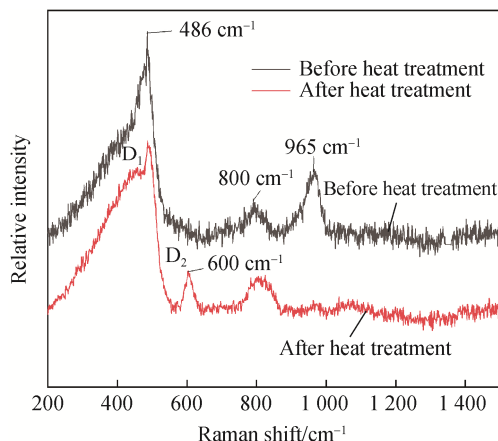
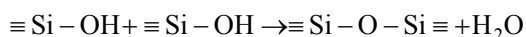


图 4 热处理前后纤维的 Raman 谱

Fig. 4 Raman spectra of fibers before and after heat treatment

纤维在酸沥滤过程中, Na⁺被 H⁺置换出来, 在纤维中形成硅羟基, 在热处理过程中硅羟基发生了缩合反应, 其反应式如下:



从反应式中可以看出, 热处理过程纤维内部的硅羟基发生缩合反应, 非桥氧转变成了桥氧。所以在热处理前的 Raman 谱中 965 cm⁻¹ 处的不对称伸缩振动峰在热处理后消失了。

图 5 为经平滑处理后不同热处理温度的纤维 Raman 光谱。图 6 和图 7 分别为经基线调整后的纤维缺陷谱线 D₁ 和缺陷谱线 D₂。可以看出, 经过不同温度热处理后, 纤维在波数为 485 cm⁻¹ 和 600 cm⁻¹ 附近的弯曲振动峰并没有发生明显偏移。Poe 和

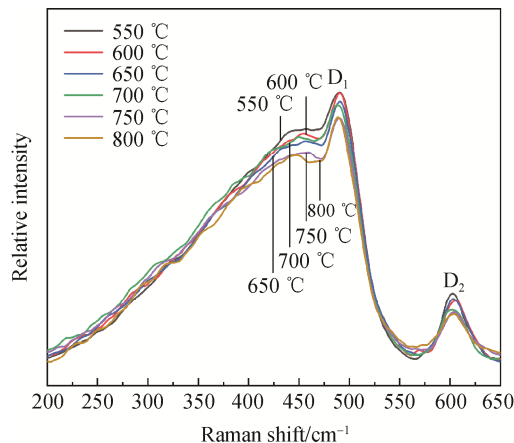


图 5 不同温度热处理后纤维的 Raman 谱

Fig. 5 Raman spectra of fibers after heat treatment at different temperatures

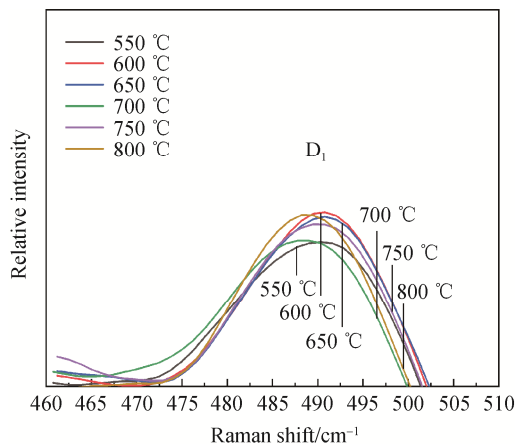


图 6 基线处理后的纤维缺陷谱线 D₁

Fig. 6 Defect line D₁ of fibers after baseline treatment

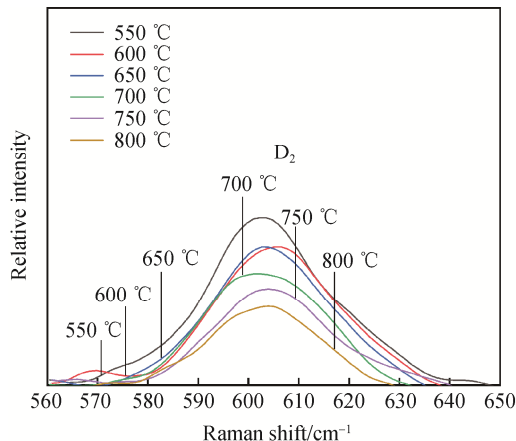


图 7 基线处理后的纤维缺陷谱线 D₂

Fig. 7 Defect line D₂ of fibers after baseline treatment

Champagnon 等^[16-17]的研究指出, 600 cm^{-1} 处 D_2 峰与 485 cm^{-1} 处 D_1 峰面积的比值被作为“虚拟温度”变化的指标, 这与玻璃的密度变化有关, D_2 峰与 D_1 峰面积的比值越大, 玻璃越致密。

从图 6、图 7 可以看出, 虽然不同温度热处理后纤维 D_1 峰的起始位置不同, 但是峰面积变化不大, 而从图 6 可以看出, 经过不同温度的热处理后, 纤维的 D_2 峰面积随着热处理温度的升高逐渐下降。这说明经过不同温度热处理的纤维致密化程度不同, 从 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理纤维的致密度依次减少。

表 2 为经过不同温度热处理后纤维的直径。由表 2 可知, 实际测得的纤维直径与纤维直径平均收缩率也与 Raman 光谱获得的信息相一致。

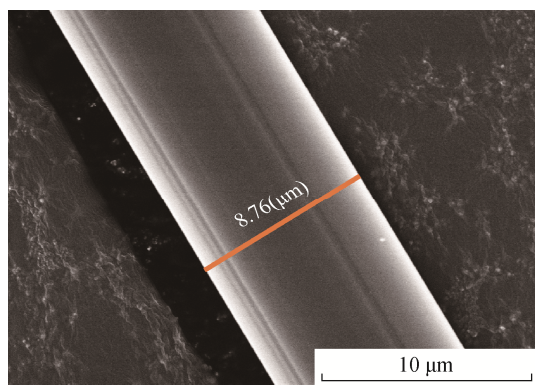
图 8a 和图 8b 分别为纤维在扫描电镜 5 000 倍放大倍数下热处理前后的形貌。通过扫描电镜图像

对比可知, 在经过热处理后, 纤维的直径发生明显收缩。图 8c 和图 8d 分别为纤维在扫描电镜 50 000 倍放大倍数下热处理前后的形貌。通过扫描电镜图像对比可知, 热处理前纤维表面存在大量凹凸不平的纳米级缺陷, 而在热处理后纤维表面更加光滑致密, 这也与 Raman 光谱获得的信息一致。

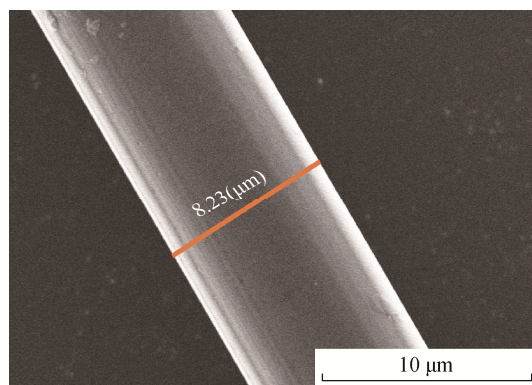
表 2 经过不同温度热处理后纤维的直径

Table 2 Diameter of fibers after heat treatment at different temperatures

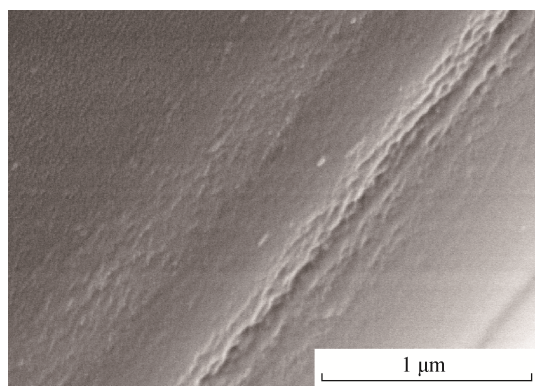
Heat treatment temperature/ $^\circ\text{C}$	Diameter before heat treatment/ μm	Diameter after heat treatment/ μm	Mean diameter shrinkage/%
550	8.76 $\pm$ 0.25	8.223 $\pm$ 0.10	6.09
600		8.193 $\pm$ 0.12	6.44
650		8.211 $\pm$ 0.10	6.23
700		8.277 $\pm$ 0.14	5.48
750		8.283 $\pm$ 0.15	5.41
800		8.256 $\pm$ 0.14	5.72



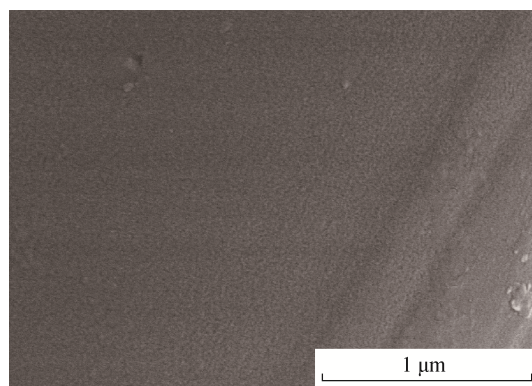
(a) Before heat treatment



(b) After heat treatment



(c) Before heat treatment



(d) After heat treatment

图 8 热处理前后纤维扫描电镜照片

Fig. 8 SEM photographs of fiber after heat treatment

3 结论

通过 Raman 光谱分别分析了酸沥滤和热处理后的 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 质量比为 8:2 的 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 二元系玻璃纤维, 结果表明: 酸沥滤过程使硅氧四面体的

弯曲振动峰和不对称伸缩振动峰向低波数偏移, 且峰强变弱, 酸沥滤后纤维中 SiO_2 含量明显提升, 酸沥滤 8 h 后, 纤维中 SiO_2 含量达到 97.1%。在初始 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 二元系玻璃纤维中, Na_2O 会破坏硅氧四面体网络, 使硅氧四面体主要以从层状结构为主,

随着酸沥滤的进行纤维中的 Na^+ 被置换出来, 纤维中 SiO_2 的含量提高使 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键角增大, 使弯曲振动峰向低波数偏移, 同时玻璃网络结构中层状结构被破坏, 链状结构逐渐增多, 使不对称伸缩振动峰也向低波数偏移。而在热处理后, 纤维 Raman 光谱的不对称伸缩振动峰消失, 出现缺陷谱线 D_1 和 D_2 , 且热处理后纤维直径收缩, 致密度提高, 通过扫描电镜表征和测量纤维直径也能直观地反映纤维的收缩。这主要是由于羟基在高温下发生缩合反应, 链状结构转变为架状结构, 使伸缩振动峰消失并出现三元环结构。同时, 随着热处理温度的提高, 纤维的收缩率亦有所下降。

参考文献:

- [1] GB/T18374-2008, 增强材料术语及定义[S]. 北京: 中国标准化委员会, 2008.
- [2] 毕鸿章. 高硅氧玻璃纤维及其应用[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(4): 36–39.
BI Hongzhang. Hi-Tech Fiber Appl(in Chinese), 2003, 28(4): 36–39.
- [3] CHEN H, FU W, LI Z. Temperature and pH responsive janus silica nanoplates prepared by the sol-gel process and post-modification[J]. Langmuir, 2020, 36(1): 273–278.
- [4] 祖群, 姚正庆, 李斌, 等. 酸沥滤钠硅酸盐玻璃制造高硅氧玻璃纤维性能的研究[J]. 玻璃纤维, 2004, 1(3): 1–4.
ZU qun, YAO Zhengqing, LI Bing, et al. Glass Fiber (in Chinese), 2004, 1(3): 1–4.
- [5] BJOERN O M, DAVID V, CHRISTOPHER M. Relations between the anionic structure and viscosity of silicate melts-a Raman spectroscopic study[J]. Am Mineral, 1980, 65(7/8): 690–710.
- [6] MCMILLAN P F, WOLF G H, POE B T. Vibrational spectroscopy of silicate liquids and glasses[J]. Chem Geol, 1992, 96(3/4): 351–366.
- [7] YOU J, JIANG G, XU K. High temperature Raman spectra of sodium disilicate crystal, glass and its liquid[J]. J Non-Cryst Solids, 2001, 282(1): 125–131.
- [8] 尤静林, 吴志东, 王敏, 等. 硅酸盐玻璃和熔体结构的拉曼光谱定量解析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 247–248.
YOU Jinglin, WU Zhidong, WANG Min, et al. Spectrosc Spect Anal (in Chinese), 2018, 38(10): 247–248.
- [9] 熊义, 赵虹霞, 干福熹. 阳离子对硅酸盐玻璃激光拉曼光谱影响的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(4): 997–1001.
XIONG Yi, ZHAO Hongxia, GAN Fuxi. Spectrosc Spect Anal (in Chinese), 2012, 32(4): 997–1001.
- [10] 张帅明, 罗理达, 丁林峰, 等. 酸沥滤对高硅氧玻璃纤维结构及性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1543–1549.
ZHANG Shuaiming, LUO Lida, DING Linfeng, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(8): 1543–1549.
- [11] 王晨阳, 尤静林, 王媛媛, 等. 二元钠硅酸盐玻璃及其熔体微结构的高温拉曼光谱及核磁共振研究[J]. 光散射学报, 2014, 26(4): 350–355.
WANG Chenyang, YOU Jinglin, WANG Yuanyuan, et al. J Light Scat(in Chinese), 2014, 26(4): 350–355.
- [12] 王志超, 尤静林, 王媛媛, 等. 二元碱金属硅酸盐玻璃团簇结构的拉曼散射活性及其阳离子效应[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1794–1799.
WANG Zhichao, YOU Jinglin, WANG Yuanyuan, et al. Spectrosc Spect Anal (in Chinese), 2011, 31(7): 1794–1799.
- [13] YOU J, JIANG G, CHEN H, et al. Raman spectra and structure study of silicate glasses and their liquids[J]. Rare Metals, 2006, 25(5): 431–436.
- [14] PASQUARELLO A, CAR R. Identification of Raman defect lines as signatures of ring structures in vitreous silica[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(23): 5145–5147.
- [15] VANDEMBROUCQ D, DESCHAMPS T, COUSSA C, et al. Density hardening plasticity and mechanical ageing of silica glass under pressure: a Raman spectroscopic study[J]. J Phys: Condensed Matter, 2008, 20(48): 275–278.
- [16] POE B T, ROMANO C, HENDERSON G. Raman and XANES spectroscopy of permanently densified vitreous silica[J]. J Non-Cryst Solids, 2004, 341(1): 162–169.
- [17] CHAMPAGNON B, CHEMARIN C, DUVAL E, et al. Glass structure and light scattering[J]. J Non-Cryst Solids, 2000, 274(1): 81–86.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



刘郑威, 东华大学硕士研究生, 主要研究方向为高硅氧玻璃纤维的制备, 酸沥滤对高硅氧玻璃纤维结构及性能的影响以及水溶性成膜剂对高硅氧玻璃纤维制备的影响, 已发表相关论文一篇。



汪庆卫, 教授, 博士研究生导师, 先进玻璃制造技术教育部工程研究中心副主任。主要从事高性能玻璃搪瓷、玻璃纤维/玄武岩纤维及其复合材料等方面研究。近五年获得省部级科技进步奖 7 项, 其中上海市科技进步奖 3 项, 中国轻工业联合会科技进步奖 4 项。发表论文 50 余篇, 授权专利 18 项, 主持、参与项目 40 余项, 与国内外近四十余家企业进行项目合作。