

文章编号: 1002-1582(2025)06-0675-05

# 火焰水解制备石英玻璃及其羟基增量调控机制

邓秀峰, 崔东明\*, 孔明, 谢康, 刘志坚, 程青, 崔争艳, 梁进宇

(1. 武汉烽火锐拓科技有限公司, 湖北 武汉 430000)

(2. 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘 要:** 高羟基含量的石英玻璃具备耐宇宙射线辐照特性, 在现代航空航天领域应用前景广阔。然而, 现有火焰水解沉积等方法所制备的石英玻璃, 其羟基浓度通常小于50ppm, 无法满足耐辐照石英玻璃对高羟基含量的需求。针对该问题, 文章讨论了石英玻璃中羟基的赋存形式、形成机制, 分析了影响羟基含量的主控因素, 形成了火焰水解合成石英玻璃过程中羟基增量调控理论。在此基础上, 通过实验论证了羟基增量调控理论的可行性; 结果显示, 通过采用多方法协同的羟基增量调控策略, 将石英玻璃中的羟基含量从1.2ppm提高至201.2ppm。

**关 键 词:** 光学材料; 火焰水解; 石英玻璃; 耐辐照; 羟基; 机制

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

## Preparation of silica glass by flame hydrolysis and its hydroxyl group increment regulation mechanism

DENG Xiufeng, CUI Dongming\*, KONG Ming, XIE Kang, LIU Zhijian,

CHENG Qing, CUI Zhengyan, LIANG Jinyu<sup>1,2</sup>

(1. Wuhan FiberHome Ruituo Technologies Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

(2. FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Silica glass with high hydroxyl content is resistant to cosmic ray irradiation, which is promising for modern aerospace applications. However, the hydroxyl concentration of silica glass prepared by the flame hydrolysis deposition method is usually less than 50ppm, which cannot meet the demand for high hydroxyl content in irradiation-resistant silica glass. To address this problem, the forms and formation mechanism of hydroxyl groups in silica glass were discussed, the main factors affecting the hydroxyl content were analyzed, and thereby an incremental regulation theory of hydroxyl during the flame hydrolysis synthesis of silica glass was formed. On this basis, the relevant experiments were conducted to demonstrate the feasibility of the incremental regulation theory of hydroxyl. It was indicated by the results that the hydroxyl concentration in silica glass was increased from 1.2 to 201.2ppm by applying the synergistic incremental regulation strategy of hydroxyl with multiple methods.

**Keywords:** optical materials; flame hydrolysis; silica glass; irradiation resistance; hydroxyl group; mechanism

## 0 引 言

石英玻璃是一种由二氧化硅组成的非晶态材料, 在微观上呈现为一种由硅氧四面体单元组成

的三维空间网络结构, 原子排布具有短程有序、长程无序的特点。由于石英玻璃具有高耐热性、高光透过率、低热膨胀系数、化学稳定性和电绝缘性等一系列优良特性, 它在航空航天、光学、

收稿日期: 2025-01-03; 收到修改稿日期: 2025-06-10

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2023BAB009); 武汉市科技计划项目(2023030103010001)

作者简介: 邓秀峰(1994—), 男, 工程师, 博士, 从事无机非金属材料研究。xifeng1228@fiberhome.com

崔东明(1991—), 男, 高级工程师, 博士, 从事无机功能材料研究。

\* 通讯作者: dmcui@fiberhome.com

半导体、光通讯和光伏等领域有着广泛应用<sup>[1]</sup>。由于上述领域对材料纯度有着极高要求，因此石英玻璃的制备主要以化学合成法为主。目前，具体的制备方法包括等离子体化学气相沉积法（Plasma Chemical Vapor Deposition, PCVD）、火焰水解沉积法（Flame Hydrolysis Deposition, FHD）和溶胶-凝胶法（Sol-Gel）。由于FHD法不仅对设备要求较低，还能实现大规模制备，它在工业中的应用最为常见<sup>[2]</sup>。具体方法为，含硅化合物（如SiCl<sub>4</sub>）在高温火焰中发生水解反应，生成烟灰状的SiO<sub>2</sub>颗粒，再经过脱羟和烧结过程，即可得到石英玻璃。近年来，石英玻璃在光学材料特别是特种光学材料领域的相关应用，引起了广泛兴趣。例如，通过提高石英玻璃中羟基的含量，可以使其具备良好的耐辐照性能<sup>[3,4]</sup>，在高强度的宇宙射线、原子射线辐照下也不会发生变色<sup>[5]</sup>。当然，羟基作为石英玻璃中的一种结构缺陷，不仅会削弱其机械性能，还会诱导其在高温下的析晶行为；例如，当羟基含量超过300ppm时，石英玻璃在1000℃下的抗弯强度较室温下降40%以上，在1350℃保温24h后表面析晶层厚度可达50μm<sup>[6-8]</sup>。因此，通常将石英玻璃中羟基含量控制在500ppm以内，以确保它在极端服役环境下的性能稳定<sup>[4]</sup>。目前，耐辐照石英玻璃已经广泛用作“神舟”系列宇宙飞船的窗口材料、“天宫”系列空间实验室关键部件的防护罩等<sup>[9]</sup>。因此，在火焰水解沉积制备石英玻璃的基础上，建立羟基增量调控理论并开发相应有效方法，对于实现大尺寸、高耐辐照石英玻璃的制备具有重要的指导意义。基于现有的火焰水解制备石英玻璃工艺，本文讨论了石英玻璃中羟基的赋存形式与形成机制，分析了影响羟基含量的主控因素，据此形成了羟基的增量调控理论，并对该理论进行了实验论证。

## 1 羟基赋存形式

羟基能与硅氧四面体发生化学键合，降低硅氧网络的聚合度，从而影响石英玻璃的结构稳定性和其它物化性能。据文献报道<sup>[10,11]</sup>，在石英玻璃中，羟基的存在形式主要有三种，如图1所示：图（a）孤立羟基（Si-OH），FTIR光谱位于3690cm<sup>-1</sup>位置；图（b）相邻羟基（Si-OH·HO-Si），是两种相互作用的羟基对，位于3665cm<sup>-1</sup>和3615cm<sup>-1</sup>；图9（c）强氢键羟基（Si-OH---O-Si），是一种通过氢键与Si-O基团相连的羟基，位于3510cm<sup>-1</sup>。孤立羟基、强氢键羟基属于稳定羟基形式，在脱羟过程中生成H<sub>2</sub>；然而，相互临近的羟基对会发

生缩聚从而生成H<sub>2</sub>O，由于H<sub>2</sub>O在石英玻璃中扩散速率极低，所以相邻羟基是最难消除的。对于火焰水解合成法制备的石英玻璃，不同羟基的含量排序依次为：相邻羟基>强氢键羟基>>孤立羟基。

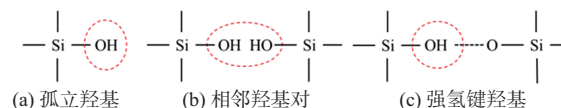


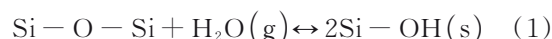
图1 石英玻璃中羟基的存在形式

## 2 羟基形成机制

通过FHD法制备合成石英玻璃时，氢气以及燃料燃烧产物水都会对羟基的形成机制造成影响，具体如下。

### 2.1 与水反应生成羟基

高温过程下，石英玻璃中的硅氧网络会发生解聚，并与水分子反应生成Si-OH（硅羟基或硅醇），反应式表示为



该反应是一个可逆反应，同时也是吸热反应；因此，提高反应温度会增加正向反应速率，促使反应迅速达到平衡<sup>[10, 12]</sup>。

根据化学反应平衡原理，除了反应温度外，物质浓度（特别是水蒸气浓度）和压力也是影响反应平衡的因素。此外，在实际生产过程中，由于无法保证充足的反应时间和反应系统的封闭性，该反应很难达到平衡状态；因此，化学反应速率对产品中羟基浓度的影响同样不可忽视。具体来说，反应物浓度、气体反应物压强、反应温度和催化剂都是影响反应速率或产品中羟基浓度的关键因素。

### 2.2 与氢气反应生成羟基

当采用电热法熔制石英玻璃时，网络结构中的Si-O键会在氢气还原气氛下发生断裂，产生E'心缺陷（Si\*）和非桥氧缺陷（Si-O\*），可表示为



如式（2）所示，E'心缺陷（Si\*）是玻璃网络生成体离子的四个杂化轨道中只有三个与氧成键，剩下一个未能成键，被一个未成对电子所占据；而非桥氧缺陷（Si-O\*）是指硅氧网络末端的氧原子未能与其它基团成键，带有一个未成对电子。在还原性气氛下，Si-O\*可与H<sub>2</sub>反应生成Si-OH<sup>[13]</sup>，可表示为



此外，石英玻璃中同样存在氧空位缺陷（Si-Si）和过氧缺陷（Si-O-O-Si），且Si-O-O-Si也能与H<sub>2</sub>反应生成Si-OH<sup>[10]</sup>，可表示为



然而,当采用FHD法制备石英玻璃时,通常采用氢氧火焰,由于气体原料中氧气过量,基本可以将氢气消耗殆尽,因此式(3)和式(4)中的反应很难发生,合成石英玻璃中的羟基主要源自硅氧网络在高温下解聚后与水的反应,即式(1)。

### 3 羟基增量调控理论

#### 3.1 燃料与硅料

包括燃料和硅料在内的原料,可能会对石英玻璃中羟基的含量造成影响。

(1) 燃料:以氢气和甲烷两种燃料为例,由于两者的热值分别为156MJ/kg和55.5MJ/kg,在完全燃烧以释放相同的热值或达到相同的火焰温度时,甲烷的用量(质量)约为氢气的2.8倍,但生成水的质量却仅为氢气的1/11.4。因此,在保证同样的沉积温度时,相比于甲烷-氧气火焰,氢氧焰会使疏松体中生成更多的羟基。

(2) 硅料:以 $\text{SiCl}_4$ 和D4( $\text{C}_8\text{H}_{24}\text{O}_4\text{Si}_4$ )为例,当两者沉积的 $\text{SiO}_2$ 的质量相同时,由于D4在氢氧焰中的反应会产生水,而 $\text{SiCl}_4$ 则不会,反应方程式可分别表示为



因此,采用D4为硅料沉积出的疏松体中将含有更多的羟基<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 沉积与烧结温度

由于式(1)为吸热反应,当系统中其它条件不改变的情况下,提高反应温度:(1)根据阿伦尼乌斯方程,会使化学平衡常数K增大,意味着反应平衡时石英玻璃中Si-OH的含量的增加;(2)根据分子碰撞理论,升温会增加活化分子的总量,提高Si-O-Si与水反应生成Si-OH的速率。既有文献显示,通过1000°C和1atm的水蒸气对固相石英玻璃进行处理,羟基含量明显提高<sup>[15,16]</sup>;此外,在低温时,由于水蒸汽以分子形式渗入石英玻璃内部,导致该反应很难达到平衡状态。因此,无论是从反应平衡还是反应速率上来说,提高沉积时的火焰温度(即氢气流量)或烧结时的温度,都将有助于促进石英玻璃中更快、更多地形成Si-OH<sup>[17]</sup>。

然而,在实际生产过程中,温度的变化势必会影响其它参数,导致原先系统的破坏,从而产生意料不到的效果。例如,提高沉积时的氢气流量,一方面提高了火焰温度,提高了Si-OH生成的速率和上限;但另一方面,氢气的燃烧产物水蒸气含量也会增加,且水蒸气的蒸发速度同步增加,而水蒸气作为式(1)的反应产物,其含量的变化势必影响

反应速率和最终平衡。除此之外,提高火焰温度,也会导致沉积后疏松体的密度变大、孔隙减少,导致水蒸气和其它气体难以逸出,进而会对后续脱羟和脱气过程造成不利影响,影响产品性能。

#### 3.3 反应压力

对于式(1)而言,仅有反应物水蒸气为气相,增大压力有两种方式:(1)抽气速率不变或减小,增加除水蒸气外其它气体的流量。由于对系统中水蒸气含量无影响,因此对反应平衡或速率无影响。(2)抽气速率不变或减小,只增加水蒸气的流量,系统中单位体积内水蒸气的含量或物质的量浓度增加,参与反应的水蒸气变多,反应向正反应方向移动且反应速率加快。

在实际的沉积过程中,腔体压力需要维持在负压,从而保证废气能及时排出,避免安全事故,因此腔体压力不建议修改。此外,在烧结过程中,可采用底部通水蒸气同时降低上方抽风速率的方法,来提高炉心管内的压力,从而使更多的水蒸气参与反应生成羟基,以此来提高石英玻璃中的羟基含量<sup>[18]</sup>。

#### 3.4 疏松体尺寸

以往文献对不同半径(175~275mm)疏松体的脱羟效果进行模拟<sup>[19]</sup>,得出了它们在平衡态时的羟基浓度分布云图,如图2所示。可以发现:增加疏松体的尺寸,会略微增加最终时刻的平均羟基浓度,但会导致疏松体中羟基浓度的分布不均匀。具体来说,截面中心的羟基浓度更高,而靠近热源的截面边缘处的羟基浓度更低。因此,在实际的沉积过程中,可通过增加疏松体直径来提高石英玻璃中的羟基含量,但也需要酌情考虑 $\text{SiO}_2$ 疏松体沉积的尺寸,从而平衡好羟基浓度和羟基均匀性之间的关系。

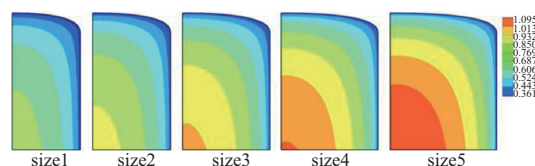


图2 不同尺寸疏松体的羟基浓度分布云图<sup>[12]</sup>(单位:mol/m<sup>3</sup>)

#### 3.5 催化剂

催化剂是一种加到反应体系中,可以降低反应活化能,从而改变反应速率,而其本身的数量和化学性质基本保持不变的物质。催化剂可以加速正反应的动力学过程,但不改变最终的反应平衡。对于式(1)来说,只要能加速硅氧键断裂并进一步与水反应的物质,都能促进该反应快速进行并形成更多的羟基。然而,通过查阅文献发现<sup>[20,21]</sup>,现有的可以加速玻璃中硅氧键断裂的催化剂,如盐酸、氢氧化钠,难以在实际工程中应用,且还会导致杂质的残留,影响石英玻璃纯度和品质。

4 羟基增量调控实验

基于上述理论分析并结合石英玻璃生产的实际情况，本实验部分通过采用D4代替SiCl<sub>4</sub>作为硅料、提高沉积时H<sub>2</sub>流量、减少脱羟时间并提高压力三种措施，来对石英玻璃中的羟基进行增量调控。

4.1 原料与方法

本实验所用的硅料和其它气体的纯度如表1所示。

表1 实验所用主要原料的纯度

| 原料 | SiCl <sub>4</sub> | D4  | CH <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> |
|----|-------------------|-----|-----------------|----------------|----------------|
| 纯度 | 5N                | 2N8 | 4N              | 4N             | 3N8            |

采用图3所示的方法制备石英玻璃。首先，以SiCl<sub>4</sub>或D4为硅料在CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>或H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>火焰水解，并在靶棒上沉积SiO<sub>2</sub>粉末，反应式如式（5）和式（6）所示；然后，将SiO<sub>2</sub>疏松体放入烧结炉中依次进行脱羟（温度1140℃，通O<sub>2</sub>、He、Cl<sub>2</sub>）和烧结（温度1460℃，通He）；最后将得到的石英玻璃棒进行切割和抛光，获得石英玻璃。需要说明的是，本实验中所用的两根SiO<sub>2</sub>疏松体采用采用同一设备和同一工艺配方制备，平均直径分别为116mm和117mm，长度均为750mm，密度分别为0.345g/cm<sup>3</sup>和0.336g/cm<sup>3</sup>。因此，可认为石英玻璃样品中的羟基含量与疏松体的尺寸及其羟基含量无关。

本论文共设计了两组实验，具体实验参数如表2所示。

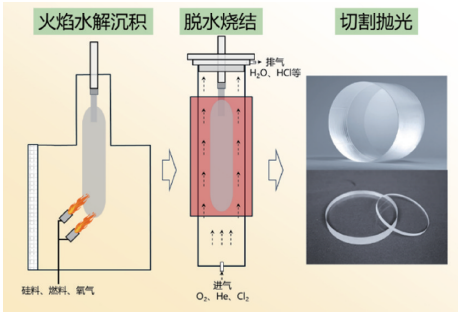


图3 FHD法制备石英玻璃的步骤

表2 实验的主要参数

| 样品类型 | 硅料类型              | 稳定阶段H <sub>2</sub> 流量 | 脱羟时间/h | 烧结时间/h | 炉内压力        |
|------|-------------------|-----------------------|--------|--------|-------------|
| 样品1  | SiCl <sub>4</sub> | 120 SLM               | 7      | 10     | 1.0±0.3 bar |
| 样品2  | D4                | 150 SLM               | 5      | 10h    | 5±0.3 bar   |

由于石英玻璃中羟基含量与其在波长2.73μm（或波数3663cm<sup>-1</sup>）处光吸收强度呈线性关系，根据GB/T 12442-2019《石英玻璃中羟基含量检验方法》<sup>[22]</sup>以及参考文献[23]、[24]，通过傅里叶变换红外光谱仪（PerkinElmer Spectrum™ 3 FT-IR spectrometer）测试石英玻璃中的羟基含量。测试波长范围为450~4000cm<sup>-1</sup>，分辨率为0.5cm<sup>-1</sup>。取石英

玻璃的中心部分，将其加工成25×12mm的薄片状，用酒精和去离子水清洗烘干后用于红外光谱测试。通过下式计算羟基含量

$$C=965\times\frac{1}{d}\lg\frac{I_0}{I} \tag{7}$$

式中，C为羟基含量，ppm；d为样品厚度，mm；I<sub>0</sub>为2.73μm处基线到零线的距离，mm；I为2.73μm处吸收峰到零线的距离，mm。

4.2 实验结果分析

不同样品的FTIR图谱如图4所示。从中可知，样品1在3663cm<sup>-1</sup>处的吸收峰并不明显，而样品2在该处的吸收峰比较尖锐，意味着后者羟基含量更高。

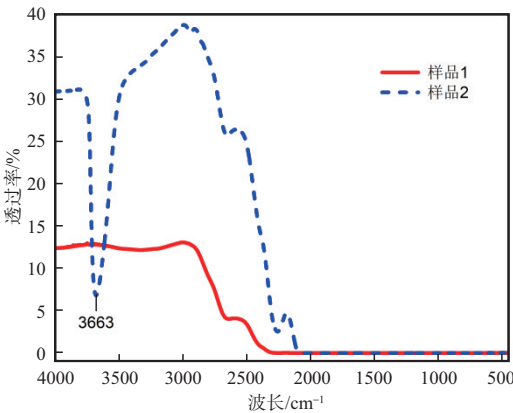


图4 不同样品的FTIR图谱

利用式（7）计算两个样品中的羟基含量，结果见表3。从中可知，样品1中的羟基含量极低，仅为1.2ppm；而样品2中的羟基含量达到201.2ppm，相比前者提高了两个数量级。上述结果证明，基于本文设计的羟基增量调控理论对传统石英玻璃的制备工艺进行改进，有望制造出羟基含量更高的石英玻璃，从而达到更强的耐辐照效果。

表3 不同样品的羟基含量结果

| 样品 | 试样厚度d/mm | 基线到零线距离I <sub>0</sub> /mm | 吸收峰到零线距离I/mm | 羟基含量C/ppm |
|----|----------|---------------------------|--------------|-----------|
| 1  | 3.4      | 12.86                     | 12.74        | 1.2       |
| 2  | 3.2      | 31.89                     | 6.86         | 201.2     |

5 结 论

本文讨论了石英玻璃中羟基的赋存形式、形成机制，分析了影响羟基含量的主控因素，并据此提出了多种羟基增量调控策略：（1）选择高纯度D4代替SiCl<sub>4</sub>，沉积后疏松体中可保留更多羟基或水分；（2）适当提高沉积时H<sub>2</sub>流量，从而提高火焰温度和水蒸气含量；（3）减少脱羟时间，提高炉中水蒸气含量，并通过降低抽风速度维持腔体微正压。通过上述方法，可将火焰水解制备石英玻璃中的羟基含量从1.2 ppm提高至201.2 ppm，有望显著改善

石英玻璃的耐辐照性能。但需注意的是,羟基属于石英玻璃硅氧网络结构中的结构缺陷,含量过高会导致析晶、失透甚至变形,同时还会降低其机械强度和化学稳定性,特别是在高温服役条件下。因此,需要对石英玻璃中的羟基含量进行严格控制,从而平衡好其耐辐照性能与其它性能间的关系。

#### 参考文献:

- [1] 吴兴轩,朱满康,贾渊洁,等.从发明专利看石英玻璃合成工艺的研究与发展[J].硅酸盐通报,2013,32(04):646—650+656.  
Wu Xingxuan, Zhu Mankang, Jia Yuanjie, et al. Review on synthesizing processes of fused silica from patents in latest decades[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(04):646—650+656.
- [2] 聂兰舰,王玉芬,向在奎,等.高性能光学合成石英玻璃的制备和应用[J].光学精密工程,2016,24(12):2916—2924.  
Nie Lanjian, Wang Yufen, Xiang Zaikui, et al. Preparation and application of high-performance synthetic optical fused silica glass [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12):2916—2924.
- [3] Faile S P, Roy D M. Mechanism of color center destruction in hydrogen impregnated radiation resistant glasses[J]. Mater Res Bull, 1970, 5(6):385.
- [4] 王振林,成来飞.玻璃的辐照效应及耐辐照改性研究进展[J].材料导报,2017,31(05):94—99.  
Wang Zhenlin, Cheng Laifei. Irradiation effects and irradiation resistance modification of glasses[J]. Materials Reports, 2017, 31(05):94—99.
- [5] 魏来,凌雪,吴俊豪,等.玻璃材料的宏观辐照效应[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2024,54(08):5—30.  
Wei Lai, Lin Xue, Wu Junhao, et al. Macroscopic and microscopic radiation effects on glass materials[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2024, 54(08):5—30.
- [6] 张晓强,孙元成,贾永雷,等.不同类型石英玻璃的振动能量损耗特性对比分析[J].硅酸盐通报,2022,41(11):4095—4102.  
Zhang Xiaoqiang, Sun Yuancheng, Jia Yonglei, et al. Comparative analysis of mechanical energy loss in different types of silica glass[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(11):4095—4102.
- [7] Shelby J E. Hydrogen, hydride and water in amorphous SiO<sub>2</sub> Protonic species in vitreous silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1994, 179:138—147.
- [8] P W McMillan, A Chlebik. The effect of hydroxyl ion content on the mechanical and other properties of soda-lime-silica glass [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1980, 38:509—514.
- [9] 孙元成,赵慧峰,孙丽娜.中国建材总院新材料护航“天宫二号”[J].中国建材,2016,10:78.  
Sun Yuancheng, Zhao Hui Feng, Sun Lina. China National Building Materials Academy's new materials escort “Tiangong-2” [J]. China Building Materials, 2016, 10:78.
- [10] 周永恒.石英玻璃及原料中羟基的研究[D].北京:中国建筑材料科学研究院,2002:11—13.  
Zhou Yongheng. Research on the hydroxyl groups in the silica glass and its materials[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2002:11—13.
- [11] 符博,王慧,贾亚男,等.石英玻璃中羟基对其性能的影响[J].硅酸盐通报,2017,36:336—339.  
Fu Bo, Wang Hui, Jia Yanan, et al. Effect of hydroxylation in quartz glass on its properties[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36:336—339.
- [12] 周永恒,顾真安.石英玻璃及其水晶原料中羟基的研究[J].硅酸盐学报,2002,30(3):357—361.  
Zhou Yongheng, Gu Zhenan. Study on hydroxyl in quartz glass and quartz raw materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(3):357—361.
- [13] 姚用真. VAD法的脱水与透明化技术[J]. 光纤与电缆及其应用技术,1984,(01):51—58.  
Yao Yongzhen. Dehydration and clarification technology of VAD method[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 1984, (01):51—58.
- [14] 黄泽宇,黄耀松,陈靖,等.入口条件对D4合成石英玻璃的影响[J].燃烧科学与技术,2018,24(06):477—486.  
Huang Zeyu, Huang Yaosong, Chen Jing, et al. Effects of entrance conditions on fused silica glass synthesis using D4[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2018, 24(06):477—486.
- [15] Peter B McGinnis, James E Shelby. Diffusion of water in float glass melts[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1994, 177:381—388.
- [16] Peter B McGinnis, James E Shelby. Diffusion of water in vitreous silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1994, 179:185—193.
- [17] Velmzhov A P, Sukhanov M V, Churbanov M F, et al. Behavior of hydroxyl groups in quartz glass during heat treatment in the range 750–950°C[J]. Inorganic Materials, 2018, 54(09):925—930.
- [18] 聂兰舰,向在奎,饶传东,等.石英玻璃的制备方法及其石英玻璃:201610798851.4[P]. 2016-08-31.  
Nie Lanjian, Xiang Zaikui, Rao Chuangdong, et al. Silica glass and its preparation method: 201610798851.4 [P]. 2016-08-31.
- [19] 马千里.高纯石英玻璃制备过程的研究和工艺优化[D].武汉:华中科技大学,2020:72—83.  
Ma Qianli. Study and process optimization towards the fabrication of high-purity silica glass[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020:72—83.
- [20] Yunhao Xi, Nengwu Zhu, Junlin Huang, et al. Na<sub>2</sub>O induced stable heavy metal silicates phase transformation and glass network depolymerization[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380:135009.
- [21] Kai Bai, Kemian Qin, Zhaoxuan Jin, et al. Water corrosion mechanisms in ternary sodium borosilicate glass under varied pH conditions[J]. Ceramics International, 2025, 51(12):15149—15159.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12442-2019 中华人民共和国国家标准:石英玻璃中羟基含量检验方法[S].北京:中国标准出版社,2019.  
National Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12442-2019 The People's Republic of China Public Security National Standards: Test method for the hydroxyl groups content of silica glass[S]. Beijing: China Standard Press, 2019.
- [23] 梁海霞.玻璃管中羟基含量的测定[J].江西化工,2013(04):159—161.  
Liang Haixia. Measurement for the hydroxyl content of glass tube[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2013(04):159—161.
- [24] 刘伟,王莉丽,刘连利,等.石英玻璃中羟基含量测定的红外光谱法研究[J].渤海大学学报(自然科学版),2008,29(04):332—335.  
Liu Wei, Wang Lili, Liu Lianli, et al. Determination of hydroxy in quartz glass by infrared spectrology[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2008, 29(04):332—335.