

文章编号: 1000-4734(2022)02-0239-08

# 镁、锂电气石/玻璃复合材料的制备与 负离子释放性能对比

李欣格<sup>1</sup>, 何婕<sup>1</sup>, 罗群<sup>1</sup>, 张彧嘉<sup>2</sup>, 王雨辰<sup>1</sup>,  
郝木难<sup>2</sup>, 孟德忠<sup>2,3\*</sup>, 赵长春<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 数理学院, 北京 100083;  
3. 中国地质大学(北京) 郑州研究院, 河南 郑州 451283)

**摘要:** 采用丝网印刷技术, 以天然电气石粉末为原料成功制备了镁电气石/玻璃复合材料与锂电气石/玻璃复合材料, 并在密闭空间测量了电气石/玻璃复合材料的负离子释放性能。负离子测试结果表明, 当镁电气石/玻璃复合材料与锂电气石/玻璃复合材料的附着面积为 76.97 cm<sup>2</sup> 时, 负离子释放量分别为 202 cm<sup>3</sup> 和 208 cm<sup>3</sup>, 说明镁与锂电气石/玻璃复合材料的负离子释放性能近似, 廉价镁电气石可以替代价格昂贵的锂电气石用于制备具有负离子释放性能的玻璃材料。进一步研究发现, 当电气石粉末附着面积增加一倍时, 镁与锂电气石/玻璃复合材料负离子释放量均提高为原来的 3 倍左右。

**关键词:** 丝网印刷; 镁电气石/玻璃复合材料; 锂电气石/玻璃复合材料; 负离子释放性能

**中图分类号:** P574; P579

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.029

**第一作者:** 李欣格, 女, 2000 年生, 本科生. E-mail: 506774104@qq.com

## Preparation and comparative study on negative ion release property of Mg and Li tourmaline/glass composites

LI Xin-ge<sup>1</sup>, HE Jie<sup>1</sup>, LUO Qun<sup>1</sup>, ZHANG Yu-jia<sup>2</sup>, WANG Yu-chen<sup>1</sup>, HAO Mu-nan<sup>2</sup>,  
MENG De-zhong<sup>2,3\*</sup>, ZHAO Chang-chun<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou 451283, China)

**Abstract:** In this study, the Mg tourmaline/glass composites and Li tourmaline/glass composites were prepared by screen printing technology, in which the mixture of the grinded tourmaline powder and glaze with the weight ratio of 1:5 were first calcined at 500 °C for 12 h and then quenched by strong wind to room temperature. The negative ion release property results indicated that Mg tourmaline/glass composites and Li tourmaline/glass composites are similar, where the mean value of negative ion is 202 cm<sup>3</sup> and 208 cm<sup>3</sup> respectively when the attachable area is 76.97 cm<sup>2</sup>. Thus, the expensive Li tourmaline can be replaced by the cheap Mg tourmaline. When the attachable area of tourmaline powder is doubled, the negative ion release values of Mg tourmaline/glass composites and Li tourmaline/glass composites are increased by 3 times.

**Keywords:** screen printing; Mg tourmaline/glass composites; Li tourmaline/glass composites; negative ion release property

**收稿日期:** 2020-07-21

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(编号: 51472224); 中国地质大学(北京)大学生创新创业训练计划项目(编号: 201911415103)

\* 通讯作者, E-mail: meng@cugb.edu.cn

电气石是一种由 Al、Na、Ca、Mg、Li、Si、和 Fe 等元素组成的化学成分复杂的天然硅酸盐矿物。电气石可以永久性地释放负离子<sup>[1-5]</sup>。空气中负离子具有增强全身的肌体活力，镇静自律神经的作用，被誉为空气中的“维生素和生长素”。因此，电气石及含有电气石的复合材料有净化空气、减少空气污染对人体的伤害、调节城市气候的作用<sup>[6-7]</sup>，可应用于环保、材料、医疗等领域<sup>[8-9]</sup>，例如用于制作内墙涂料、陶瓷坯釉料、污水处理等<sup>[10-12]</sup>。

目前电气石复合材料的制备方法通常为电镀表面法、镶嵌内部法和浸泡法，但是这些方法不仅会造成电气石晶体聚集，而且会使玻璃内部的电气石不能充分释放负离子，弱化了电气石净化空气的作用，导致材料利用效率低和浪费严重。本课题组在前期研究工作中将锂电气石与玻璃复合，得到释放负离子效果良好的产品，其负离子浓度可达到  $7190 \text{ cm}^{-3}$ <sup>[13-17]</sup>。但锂电气石价格昂贵，投入日常生活生产成本过高，而镁电气石价格低廉，同样具有负离子释放特性，是理想的工业化材料。我们拟使用镁电气石替代锂电气石，采用丝网印刷技术，将其与玻璃充分结合制作成“保健玻璃”，使镁电气石/玻璃复合材料达到锂电气石/玻璃复合材料释放负氧离子相同的效果，从而更适用于工业生产和日常生活。

考虑到电气石/玻璃复合材料释放负离子的性能与材料、附着面积等因素有关，本实验拟对比镁电气石/玻璃复合材料与锂电气石/玻璃复合材料的负离子释放性能，以及电气石粉末附着面积对负离子释放量的影响，探索性能更优良的电气石/玻璃复合材料。

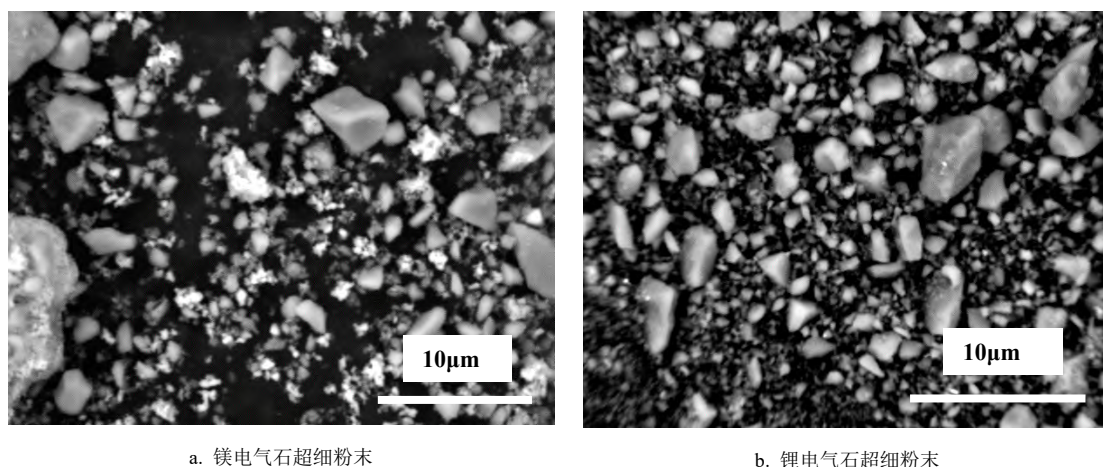
## 1 实验

### 1.1 电气石原料的选取与物相表征

天然镁、锂电气石分别来自中国河北省燕新矿和江苏省东海县。实验利用 X 射线衍射仪(XRD, 辐射源:  $K_{\alpha}$  射线, Cu 靶,  $\lambda=0.15406 \text{ nm}$ , 40 kV, 40 mA, 扫描范围  $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$ )对矿物晶体的物相进行表征,同时利用射线能谱仪(EDS, Energy Dispersive Spectroscopy)对电气石晶体的元素组成进行测试。

### 1.2 电气石粉末的制备

利用四立柱压力机初步破碎电气石,从含有少量杂质的颗粒中人工挑选出结晶良好的电气石颗粒。将经过筛选的电气石颗粒分为 6 组,每组 150 g,利用行星式球磨机研磨 3 h。将研磨好的电气石粉末按每份 150 g 进行分装,用扫描电子显微镜对电气石粉末进行形貌表征,如图 1 所示,电气石晶体已研磨为无团聚的微米级粉末。



a. 镁电气石超细粉末

b. 锂电气石超细粉末

图 1 镁电气石和锂电气石超细粉末的 SEM 图

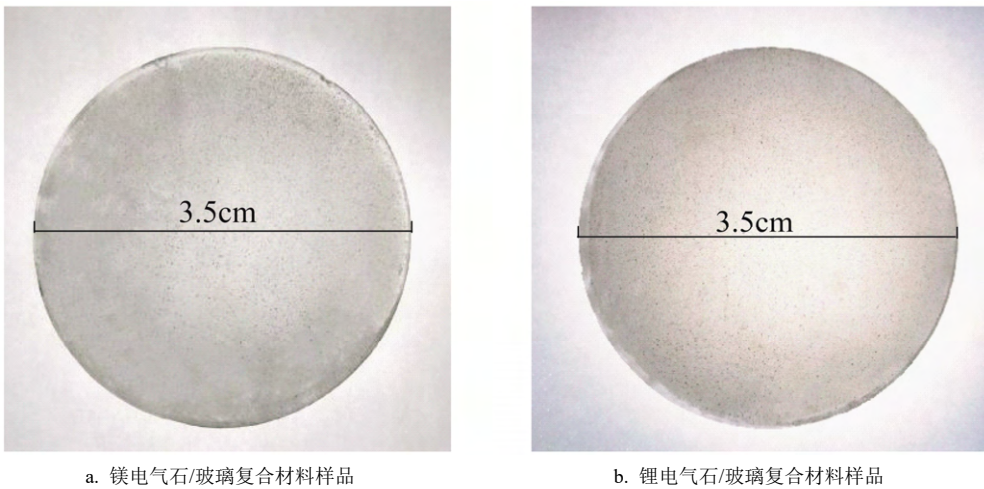
Fig. 1. The SEM image of the hyperfine powder of Mg tourmaline and Li tourmaline.

### 1.3 电气石/玻璃复合材料的制备

实验采用丝网印刷技术制备电气石/玻璃复合材料, 丝网印刷版如图 2 所示。电气石/玻璃复合材料的制备方法如下: 把超细电气石粉体与二氧化钛按照质量比 1:5 的比例混合均匀并研磨, 混合物在 300 °C 的马弗炉中保温 1 h, 完全冷却后与釉料 (主要成分为水性聚氨酯) 以 1:5 的质量比混合均匀作为原始油墨。用于涂覆油墨的钢化玻璃在实验前用酒精进行充分清洁。丝网印刷的过程是在丝网印版的一端倒入油墨, 用刮板对丝网印版上的油墨部位施加一定压力, 同时朝丝网印版另一端匀速移动, 油墨在移动中被刮板从网孔中挤压到钢化玻璃上, 使其均匀附着在钢化玻璃上。将附着有油墨的印刷版烘干处理后, 置于 500 °C 的钢化炉中烧制 12 h, 然后利用强冷风使其表面急剧降温, 令釉料与玻璃充分结合, 确保新产物不会脱釉, 最终制备出新型的电气石/玻璃复合材料, 如图 3 所示。本实验把电气石复合材料附着在钢化玻璃上的面积定义为附着面积。分别在钢化玻璃的单面和双面进行丝网印刷得到的附着面积是 38.48 cm<sup>2</sup> 和 76.97 cm<sup>2</sup>, 经测量得到钢化玻璃上油墨厚度约 30~40 μm。



图 2 丝网印刷模板  
Fig. 2. The template of screen printing.



a. 镁电气石/玻璃复合材料样品                      b. 锂电气石/玻璃复合材料样品

图 3 镁电气石/玻璃复合材料与锂电气石/玻璃复合材料样品  
Fig. 3. The samples of Mg and Li tourmaline/glass composites.

### 1.4 电气石/玻璃复合材料释放负离子量测试

根据《材料诱生空气离子量测试方法》和《材料负离子发生量的测试方法》<sup>[18]</sup>规定的负离子浓度测量方法, 本实验将电气石/玻璃复合材料放在实验仓中, 然后测试实验仓内负离子浓度。本实验所采用的仪器为日本 KECC900 型负离子测试仪, 测试温度为 25 °C, 湿度为 25%, 镁和锂电气石/玻璃复合材料为实验组, 无电气石的玻璃材料为空白对照组。空白对照组实验时将无电气石的玻璃材料放置在实验仓内, 以每 30 min 为一个测试时间段测量负离子数值, 在 30 min 内每 1 min 记录负离子数值一次, 共计 30 个负离子量数值, 在 30 个数值内出现频率最高的负离子量数值设定为高频值。测试 3 次得到 3

个高频值, 根据 3 组高频数值计算得到平均值。实验组实验将电气石/玻璃复合材料放在实验仓中静置 2 h, 接着同样以 30 min 为一个测试时间段, 测试 3 次得到 3 个高频值, 并计算得到平均值。复合材料负离子释放量等于放置复合材料环境中负离子数的平均值与空气中负离子数平均值之差, 见公式 (1)。

$$C=A-B \quad (1)$$

式 (1) 中,  $C$  为样品负离子释放量, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ ;

$A$  为放置电气石/玻璃复合材料的环境中空气负离子浓度, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ ;

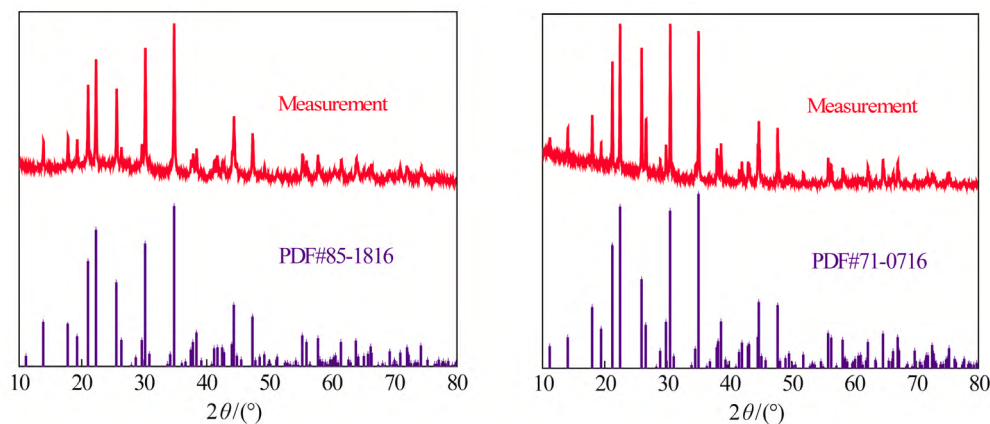
$B$  为空气负离子浓度平均值, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ 。

为了提高实验数据准确性, 将上述实验步骤重复 10 次, 分别得到镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料的平均负离子释放量。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 镁电气石和锂电气石的物相分析

为了确认天然褐色和粉色矿物晶体的主要成分, 分别对 2 种晶体进行 XRD 测试。图 4a 为褐色矿物晶体的 XRD 测试图谱与镁电气石标准卡片 (PDF#85-1816) 对比图, 图 4b 为粉色矿物晶体的 XRD 测试图谱与锂电气石标准卡片 (PDF#71-0716) 的对比图。从 2 幅图可以看出衍射峰位完全对应, 特征峰明显, 表明实验选取的褐色晶体和粉色晶体分别为结晶质量良好的纯相镁电气石和锂电气石。



a. 褐色矿物晶体的 XRD 图谱及镁电气石的标准图谱

b. 粉色矿物晶体的 XRD 图谱及锂电气石的标准图谱

图 4 镁电气石和锂电气石的 XRD 图谱

Fig. 4. The XRD pattern of Mg and Li tourmaline.

利用电子探针技术对镁电气石和锂电气石进行了化学成分测试, 分析结果见表 1。根据电气石结构式  $XY_3Z_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3W_4$  ( $X$  代表 Na、Ca 或空位,  $Y$  代表 Mg、Fe、Al,  $Z$  代表 Al、Mg、Fe,  $W$  代表 OH、O、F), 得到镁电气石和锂电气石的结构式如下:

镁电气石:  $\text{Na}_{0.303}\text{Ca}_{0.058}\text{Mg}_{1.78}\text{Fe}_{0.036}\text{Al}_{4.57}\text{Si}_{8.621}\text{O}_{21.38}(\text{BO}_3)_{2.95}$

锂电气石:  $\text{Na}_{0.064}\text{Ca}_{0.52}\text{Li}_{1.44}\text{Fe}_{0.077}\text{Al}_{5.352}\text{Si}_{8.133}\text{O}_{21.4}(\text{BO}_3)_{3.07}$

综上, 本实验选取的锂、镁电气石符合其理想结构式组成, 满足制备复合材料的需求。

表 1 镁和锂电气石成分分析结果 ( $w_B/\%$ )

Table 1. The composition analysis of Mg tourmaline and Li tourmaline

样品	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	FeO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O	合计
镁电气石	1.26	9.54	0.44	0.34	22.36	34.74	31.31	0.00	99.99
锂电气石	0.27	0.00	4.04	0.77	19.85	34.01	38.05	3.01	100.00



### 2.2 镁与锂电气石/玻璃复合材料物相分析

图 5a 是镁电气石粉末与镁电气石/玻璃复合材料的 XRD 测试图谱对比图, 图 5b 是锂电气石粉末与锂电气石/玻璃复合材料的 XRD 测试图谱对比图。从 2 幅图可以看出玻璃复合材料的衍射峰位与原始粉末基本对应, 特征峰明显。除了电气石的衍射峰之后, 还有起到增白玻璃效果的 TiO<sub>2</sub> 衍射峰。实验结果表明, 经过丝网印刷的复合材料成分纯净, 较大限度地保证纯相电气石的存在, 从而能够使电气石粉末释放负离子, 是理想的负离子释放复合材料。

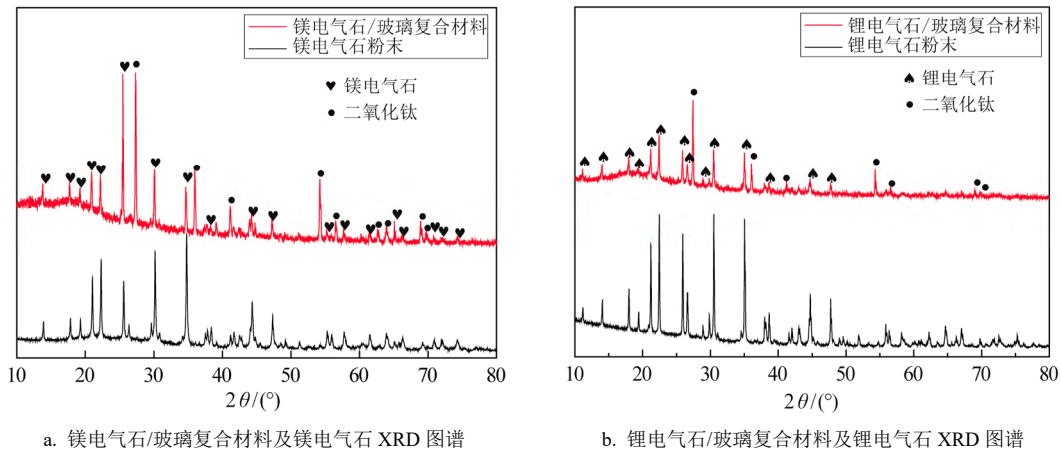


图 5 镁电气石/玻璃复合材料及镁电气石 XRD 图谱和锂电气石/玻璃复合材料及锂电气石 XRD 图谱  
Fig. 5. XRD pattern of Mg tourmaline, Mg tourmaline/glass composites, Li tourmaline, Li tourmaline/glass composites.

### 2.3 镁与锂电气石/玻璃复合材料释放负离子性能对比分析

图 6 是未放置电气石/玻璃复合材料的实验仓中空气的负离子量随时间的变化图。可以看出在 30 min 测试中, 0 cm<sup>-3</sup>、10 cm<sup>-3</sup>、20 cm<sup>-3</sup> 分别出现 5 次、13 次、11 次, 占数据总数 16%、43%、37%, 因此, 10 cm<sup>-3</sup> 为高频值。图 7 为镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料负离子释放量的散点图, 其中测量负离子量的钢化玻璃板面积均为

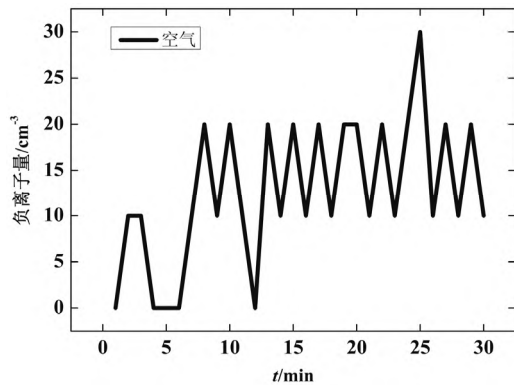


图 6 未放入电气石/玻璃复合材料的负离子量散点图  
Fig. 6. The scatter diagram of negative ion release value without tourmaline/glass composite.

76.97 cm<sup>3</sup>。从图中可以看出镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料的负离子释放量高频值分别为 180 cm<sup>-3</sup> 和 230 cm<sup>-3</sup>。

根据负离子释放量散点图可以得到每个时间段内的负离子释放量高频值和平均值, 其中样品负离子释

放量高频值分别为 180 cm<sup>-3</sup> 和 230 cm<sup>-3</sup>。图 7 为镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料负离子释放量的散点图, 其中测量负离子量的钢化玻璃板面积均为

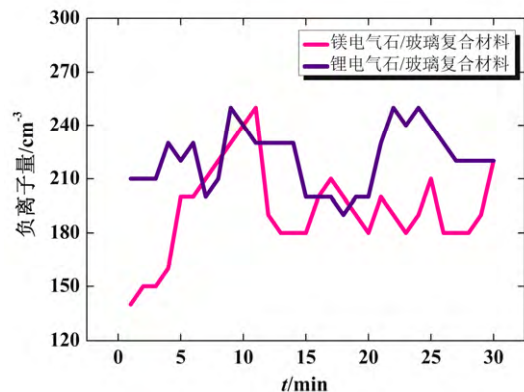


图 7 镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料负离子释放量散点图  
Fig. 7. The scatter diagram of negative ion release value in air with Mg tourmaline/glass composites and Li tourmaline/glass composites respectively.

放量为放入电气石玻璃负离子释放量高频值的平均值与空白组负离子释放量高频值的平均值之差。为了减少偶然误差,同一实验重复 10 次得到实验仓内镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料放入前后负离子释放量的数据对比,如表 2 和表 3 所示。从表 2 和表 3 可以看出镁电气石的负离子高频值最高达到  $240 \text{ cm}^3$ , 平均值为  $212 \text{ cm}^3$ , 释放量平均值为  $202 \text{ cm}^3$ ; 锂电气石的负离子高频值最高达到  $240 \text{ cm}^3$ , 平均值为  $218 \text{ cm}^3$ , 释放量平均值为  $208 \text{ cm}^3$ 。

综上所述,在相同的实验条件和环境

下,镁电气石/玻璃复合材料与锂电气石/玻璃复合材料释放负离子浓度相近。但是结合材料成本,天然锂电气石价格远高于天然镁电气石,因此镁电气石可以替代锂电气石,镁电气石/玻璃复合材料更适用于投入生产生活。

#### 2.4 电气石粉末附着面积与负离子释放性能的关系

为进一步研究电气石/玻璃复合材料附着面积对负离子释放量的影响规律,实验分别测量粉末附着面积为  $38.48 \text{ cm}^2$  和  $76.97 \text{ cm}^2$  时,镁与锂电气石/玻璃复合材料的负离子释放量,结果见表 4、表 5。

表 4 镁电气石粉末附着面积对负离子释放量的影响

Table 4. The influence of attachable area on negative ions release value by using Mg tourmaline/glass composites

附着面积大小/ $\text{cm}^2$	高频值/ $\text{cm}^3$	平均值/ $\text{cm}^3$	空白对照组高频值/ $\text{cm}^3$	空白对照组平均值/ $\text{cm}^3$	样品负离子释放量/ $\text{cm}^3$
38.48	70/60/60	63.33	0/10/0	3.33	60
76.97	190/200/220	203.33	30/20/0	16.67	186.66

表 5 锂电气石粉末附着面积对负离子释放量的影响

Table 5. The influence of attachable area on negative ions release value by using Li tourmaline/glass composites

附着面积大小/ $\text{cm}^2$	高频值/ $\text{cm}^3$	平均值/ $\text{cm}^3$	空白对照组高频值/ $\text{cm}^3$	空白对照组平均值/ $\text{cm}^3$	样品负离子释放量/ $\text{cm}^3$
38.48	80/80/70	76.67	10/30/0	13.33	63.34
76.97	230/220/200	216.67	30/20/0	16.67	200

表 2 实验仓内镁电气石/玻璃复合材料放入前后负离子释放量的数据对比

Table 2. The negative ion release value in the test chamber before and after the using of Mg tourmaline/glass composites

实验次数	高频值/ $\text{cm}^3$	平均值/ $\text{cm}^3$	空白对照组高频值/ $\text{cm}^3$	空白对照组均值/ $\text{cm}^3$	样品负离子释放量/ $\text{cm}^3$
1	190/200/210	200	10/10/10	6.67	193.33
2	200/220/220	213.33	20/0/10	10	203.33
3	210/220/210	213.33	10/10/10	10	203.33
4	190/200/190	193.33	20/10/0	10	183.33
5	190/220/210	226.67	10/30/0	13.33	213.34
6	190/200/210	200	10/0/20	10	190
7	210/220/220	206.67	20/0/0	6.67	200
8	240/220/210	223.33	10/20/10	13.33	210
9	220/220/210	216.67	0/20/10	10	206.67
10	230/230/210	223.33	0/10/0	3.33	220

表 3 实验仓内锂电气石/玻璃复合材料放入前后负离子释放量的数据对比

Table 3. The negative ion release value in the test chamber before and after the using of Li tourmaline/glass composites

实验次数	高频值/ $\text{cm}^3$	平均值/ $\text{cm}^3$	空白对照组高频值/ $\text{cm}^3$	空白对照组平均值/ $\text{cm}^3$	样品负离子释放量/ $\text{cm}^3$
1	230/220/200	216.67	30/20/0	16.67	200
2	210/210/200	206.67	10/10/10	6.67	200
3	210/210/210	210	10/10/10	10	200
4	220/210/200	210	20/10/0	10	200
5	230/220/200	216.67	10/30/0	13.33	203.34
6	230/220/200	216.67	20/0/0	6.67	210
7	230/240/230	233	10/0/0	3.33	230
8	230/220/220	223.33	10/20/10	13.33	210
9	230/220/220	223.33	0/20/10	10	213.33
10	230/220/220	223.33	0/10/0	3.33	220

从表4中可以看出镁电气石粉末附着面积为 $38.48\text{ cm}^2$ 和 $76.97\text{ cm}^2$ 时,负离子释放量分别为 $60.00\text{ cm}^{-3}$ 和 $186.66\text{ cm}^{-3}$ ;从表5中可以看出锂电气石粉末附着面积为 $38.48\text{ cm}^2$ 和 $76.97\text{ cm}^2$ 时,负离子释放量在分别是 $63.34\text{ cm}^{-3}$ 和 $200.00\text{ cm}^{-3}$ 。由实验数据可得,电气石粉末附着面积增加一倍,镁与锂电气石/玻璃复合材料负离子释放量均提高为原来的3倍左右。

分析认为,由于电气石周围有很高的静电场<sup>[19-20]</sup>,它可以使周围空气中的水分子发生微弱电离作用,当增大电气石粉末附着面积时也就增大了其与空气的接触面积,使复合材料释放的空气负离子数量增多。故在实验仓内,增大电气石粉末的附着面积,可在一定范围内有效增加空气负离子释放量。

## 2.5 采用丝网印刷的工艺优势

目前,电气石/玻璃复合材料的制备方法是电镀表面法、镶嵌内部法和浸泡法,这些方法不仅会造成电气石晶体聚集,同时玻璃内部电气石不能充分释放空气负离子,弱化了电气石净化空气的作用,造成材料浪费,加工方式粗糙,只适用于数据测试,缺乏美观性和实用性,无法大规模工厂生产,实用性低。

本实验使用的丝网印刷技术,利用丝网印版(常采用有柔软性和弹性的涤纶丝网<sup>[20]</sup>),使用玻璃釉料,在玻璃制品上进行装饰性印刷<sup>[21-22]</sup>,制作方法先进,操作简单且成本低廉,充分利用了玻璃附着性强的优点。制备过程压印力小,适用于易碎的玻璃制品,釉料覆盖力强,釉层厚实。同时,丝网印刷不受承印物表面形状的限制及面积大小的限制,即丝网印刷不仅可在平面玻璃上印刷,而且可在曲面<sup>[23-24]</sup>或球面玻璃上印刷,不仅适合于小面积的玻璃印刷,而且也适合在较大面积的玻璃上印刷。因此,丝网印刷技术有着很大的灵活性和广泛的适用性。

除此之外,将电气石粉末薄而均匀的附着在玻璃上,使镁电气石/玻璃复合材料具有透光不透视的特性,可应用于对私密性有较高要求的室内装修,如办公室隔层或卫生间隔层等。同时可以根据不同需求灵活地改变复合玻璃的颜色和形状,应用具有广泛性和多样性。

## 3 结论

实验选取了结晶效果良好、色泽较好的天然电气石晶体,将电气石粉末与釉料混合均匀,利用丝网印刷技术,使釉料与玻璃相结合,制备出镁电气石/玻璃复合材料和锂电气石/玻璃复合材料。镁电气石/玻璃复合材料与锂电气石/玻璃复合材料在空气中负离子释放量分别为 $202\text{ cm}^{-3}$ 和 $208\text{ cm}^{-3}$ ,可见锂电气石/玻璃复合材料的负离子释放性能略优于镁电气石/玻璃复合材料。但是考虑到材料成本,锂电气石属于宝石级别的矿物,价格远高于镁电气石,因此镁电气石可以替代锂电气石应用于日常装修材料。实验还发现,电气石粉末附着面积与空气负离子释放量呈显著正相关,当电气石粉末附着面积增加一倍时,镁与锂电气石/玻璃复合材料负离子释放量均提高为原来的3倍左右。

## 参 考 文 献:

- [1] 胡应模, 陈旭波, 汤明茹. 电气石功能复合材料研究进展及前景展望[J]. 地学前缘, 2014, 21 (05): 331-337.
- [2] Chen K, Gai X, Zhou G, et al. Study on a new type of pyroelectric materials with structure of tourmaline[J]. Ceram Int, 2019, 45(8): 10684-10690.
- [3] 马可楠. 电气石的性能及应用技术研究现状[C]//软科学论坛——企业信息与工程技术应用研讨会论文集, 2015: 54-56.
- [4] 董发勤, 何登良, 袁昌来. 电气石的环境功能属性及应用[J]. 功能材料, 2005(10): 11-14.
- [5] 何登良, 董发勤. 电气石的环境功能属性及应用研究动态[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006, 1(1): 10-10.
- [6] 朱丽娜, 温国胜, 王海湘, 等. 空气负离子的研究综述[J]. 中国农学通报, 2019, 35 (18): 44-49.
- [7] 袁昌来, 刘心宇, 王华. 天然矿物电气石产生空气负离子性能研究[C]//第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集, 2007: 3317-3319.
- [8] 林森, 孙仕勇, 申珂璇, 等. 电气石的环境功能属性及其复合功能材料应用研究[J]. 材料导报, 2017, 31 (13): 131-137.
- [9] 管登高, 陈善华, 唐科, 等. 电气石微粉的研制及其在环境功能材料中的应用[J]. 矿产综合利用, 2006 (6): 43-46.
- [10] 李文宝. 电气石功能复合材料研究进展及前景展望[J]. 建筑工程技术与设计, 2017 (27): 2140-2140.
- [11] 莫尊理, 王雅雯, 胡葱葱. 电气石功能复合材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 186-190.
- [12] 文圆, 黄惠宁, 张国涛, 等. 电气石性能与应用研究发展[J]. 陶瓷, 2019 (2): 17-24.
- [13] 周国君, 林瑛, 吕月鹏, 等. 锂电气石/玻璃复合材料的制备与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015 (S1): 52.
- [14] Shan Y, Zhou G, Chen K, et al. More superior pyroelectric performance of synthesized dravite by high-pressure solidstate method[J]. AIP Adv, 2019, 9(3): 035304.
- [15] Zhou G, Liu H, Chen K, et al, The origin of pyroelectricity in tourmaline at varying temperature[J]. J Alloys Comp, 2018, 774(5): 328-336.
- [16] Chen K, Gai X, Shan Y, et al, The influence factors of energy storage density on tourmaline[J]. Ferroelectrics, 2018, 524: 138-147.
- [17] Zhou G, Chen K, Gai X, et al, The effect of polarization frequency and temperature on polarization rule of tourmaline[J]. Ferroelectrics, 2017, 514(1): 89-96.
- [18] 王继梅, 冀志江, 王静, 等. 材料负离子发生量的测试方法[J]. 中国建材科技, 2006, 15 (3): 112-114.
- [19] Hawkins KD, Mackinnon IDR, Schneeberger H. Influence of chemistry on the pyroelectric effect in tourmaline [J]. Am Miner, 1995, 80: 491-501.
- [20] 吴瑞华, 汤云晖, 张晓晖. 电气石的电场效应及其在环境领域中的应用前景[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 474-484.
- [21] 王志华. 解读玻璃制品丝网印刷工艺[J]. 中国印刷, 2015 (10): 81-84.
- [22] 陆平. 玻璃印刷过程前的丝网选择及应用[J]. 网印工业, 2015 (10): 12-15.
- [23] 王文鹏. 丝网印刷—曲面印刷的先锋[J]. 中国科技博览, 2015: 106.
- [24] 关有俊, 何唯平, 谭亮. 电气石在内墙涂料中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2006, 35(002):81-83.