

过滤强化用极性硅盐粉末的鉴别优选

郑佳文, 赫伟东, 郭颖赫, 柳静献

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 研究了来自新疆、河北、桂林三个产地的不同粒度提纯后极性硅盐粉末样品对空气过滤材料过滤性能影响, 采用压电实验、热释电实验对各种极性硅盐粉末样品进行电极性表征鉴别优选. 结果表明: 桂林粒度 0.074 mm 提纯品位最高的极性硅盐粉末自发极化性能最佳; 将 3 种极性硅盐最高纯度的粉末分别附着滤料表面进行全尘效率实验, 桂林粒度 0.074 mm 提纯品位最高极性硅盐粉末对过滤效率提升最显著; 采用 Rietveld 方法对极性硅盐粉末 XRD 图谱精修得到晶体结构, 通过计算固有电偶极矩证明了极性硅盐自发极化产生的静电吸附作用是其提高滤料过滤性能的主要原因.

关 键 词: 极性硅盐; 自发极化; 过滤效率; 电偶极矩; 鉴别优选

中图分类号: F 272.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)03-0430-08

Identification of Optimal Tourmaline Powders for Filtration Enhancement

ZHENG Jia-wen, HE Wei-dong, GUO Ying-he, LIU Jing-xian

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Jing-xian, E-mail: 82003@126.com)

Abstract: The effects of different particle size purified tourmaline powder samples on the filtration performance of air filter materials from Xinjiang, Hebei and Guilin were studied. Electrode performance of various tourmaline powder samples was carried out by piezoelectric experiments and pyroelectric experiments to identify the preferred polarization characterization. The results show that the electrode of the 0.074 mm pure grade tourmaline has the best performance. The highest grade of three tourmaline powders is attached to the filter surface for the whole dust efficiency experiment. The 0.074 mm pure grade of tourmaline in Guilin has the highest filtration efficiency. The most significant improvement is obtained. Using the Rietveld method, the XRD pattern of tourmaline powder is refined to obtain the crystal structure. The calculation of the intrinsic electric dipole moment proves that the electrostatic adsorption caused by the spontaneous polarization of tourmaline is the main reason for improving the filtration performance of the filter material.

Key words: tourmaline; spontaneous polarization; filtration efficiency; electric dipole moment; identification

随着环境问题的日益严重,将矿物材料应用于环境净化的研究已引起人们对材料科学领域的广泛关注.由多种元素复合组成的极性硅酸盐矿物是一种环境友好材料,能够产生 $10^4 \sim 10^7$ V/m 的自发表面电场^[1-2].除了拥有自发电场外,极性硅盐的其他显著特征包括压电性、热释电性和释放负离子特性均使其可以在功能环保材料中得到

充分利用.目前的对极性硅盐的功能环保材料研究主要集中水净化领域,很少讨论其在空气过滤材料中的应用.过滤材料是控制空气中微细颗粒的核心.当阻力不变时,如何提高过滤效率是业界追求的目标.根据极性硅盐自发极化产生的电极特性增强对空气中的颗粒物的吸附作用和有害气体的降解作用,研究对空气过滤材料的性能提升

势在必行. 由于极性硅盐种类繁多, 因此需要根据极性硅盐的极化性能对不同种类极性硅盐进行鉴别选优, 以便开发出性能更优越的空气过滤材料, 研究不仅有助于加深对过滤用极性硅盐粉末性质的了解, 更能将我国丰富的极性硅盐资源最大化利用, 增强经济效益, 对我国矿产资源的综合利用和空气污染中的颗粒物的有效控制都具有重大意义.

1 实验原料与样品制备

1.1 实验原料

极性硅盐的晶体结构相对复杂, 如图 1 所示, 一般化学式为 $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$. 其中 X 表示 Ca, Na, K , 空位; Y 表示 $Li, Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn, Al, Cr^{3+}, V^{3+}, Fe^{3+}, Ti^{4+}$, 空位; Z 表示 $Mg, Al, Fe^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}$; T 表示 Si, Al, B ; V 表示 OH, O ; W 表示 $OH, F, O^{[3]}$.

本研究选择市场中常见的极性硅盐原矿样品, 分别来自新疆、河北和桂林(以下分别记作 XJ, HB, GL), 将所有极性硅盐原矿使用型号为 QBXG-2 的球磨机磨矿, 来自同一产地的极性硅盐原矿石制成粒度分别为 0.074, 0.044, 0.038 mm 的极性硅盐粉末, 用来制备不同条件的极性硅盐粉末样品进行后期优选.

1.2 样品制备

研究表明, 极性硅盐自发极化的根本原因是其晶体独特分子结构 $[BO_3]_3$ 中 B 原子向 c 轴反向

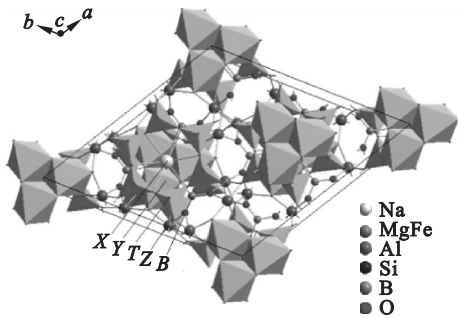


图 1 极性硅盐晶体结构
Fig. 1 Tourmaline crystal structure diagram

位移产生的晶格扭曲, 形成电偶极矩引起的^[4], 矿物分析中一般采用极性硅盐成分中 $w(B_2O_3)$ 表示极性硅盐品位, 品位越高, 矿物纯度越高. 由于天然极性硅盐粉末品位较低, 为了更好地发挥极性硅盐自发极化在空气过滤中的吸附作用, 将 0.074 mm 三种极性硅盐粉末进行一次强磁提纯处理, 再将得到的精矿进行二次精选, $w(B_2O_3)$ 测定在东北大学研究院分析测试中心完成, 表 1 所示为三种极性硅盐粉末不同粒度下的原矿品位, 磁选过程中的磁场强度和对应品位见表 2.

表 1 XJ, HB, GL 极性硅盐不同粒度下的原矿品位 Table 1 Ore grade at different particle sizes of XJ, HB, GL tourmaline			
粒度/mm	$w(B_2O_3)/\%$		
	XJ	HB	GL
0.074	8.33	8.26	7.66
0.044	7.85	4.23	7.23
0.038	6.78	4.40	7.61

表 2 XJ, HB, GL (0.074 mm) 极性硅盐粉末磁选对应品位 Table 2 XJ, HB, GL tourmaline powder magnetic selection corresponding grade (0.074 mm)						
磁场强度/T	$w(B_2O_3)/\%$					
	XJ 粗选品位	XJ 精选品位	HB 粗选品位	HB 精选品位	GL 粗选品位	GL 精选品位
0.5	8.88	7.89	8.8	7.84	9.34	8.32
0.6	8.39	7.82	8.94	8.21	9.01	8.1
0.7	7.83	7.79	9.04	7.74	8.91	8.15
0.8	7.89	7.01	8.73	8.16	8.64	8.18
0.9	8.36	8.06	8.26	8.4	8.88	8.37

从表 2 中可以明显发现经过二次精选后精矿品位均有所降低, 为了保证极性硅盐粉末品位将粒度 0.044, 0.038 mm 极性硅盐粉末均进行一次磁选提纯, 得到不同磁场强度对应品位. 经过磁选处理后得到了 XJ, HB, GL 不同粒度的极性硅盐样品, 进行鉴别优选.

2 过滤用极性硅盐粉末的鉴别优选

2.1 压电鉴别实验

极性硅盐对过滤材料的性能提升主要原因是其自身产生的电极特性, 增强对空气中颗粒物的

吸附作用. 1880 年, Jacques Curie 和 Pierre Curie 通过实验首次证明了极性硅盐的压电性, 发现其产生的电量与受到的压力成正比^[5-7]. 极性硅盐压电效应的大小取决于外界的压力及晶体的极化强度. 当极性硅盐粉末覆在滤料表面进行过滤时, 所受的风压会对极性硅盐晶体粉末的电极性产生影响, 因此需要研究压力对极性硅盐粉末的极化性能的影响效果.

将经过磁选得到的极性硅盐粉末样品进行压电性测试实验, 其中每次测量使用的粉末样品固定为 0.1 g, 样品粉末面积为 1 cm × 1.5 cm. 测量时开启步进机, 调整滑道不同位置使绝缘小锤砸在样品上产生不同的压力, 压力的数值由压力传感器测得, 使用 labview 软件导出每个样品产生的静电压数据, 压力变化使用 0.5 ~ 1.3 N 对应的重力表示, 数据采集速率为 200 个/s, 数据采集 50 s, 每 200 个静电压值取最大值再求平均值得到不同压力作用下的静电压数据, 测试装置如图 2 所示.

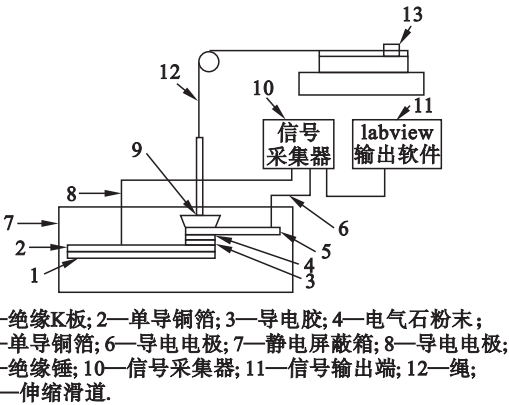


图 2 压电测试装置示意图
Fig. 2 Piezoelectricity test device schematic

图 3a ~ 3c 分别为 XJ, HB, GL 粒度 0.074 mm 极性硅盐在不同磁场强度下粗选的粉末样品压电性测试结果. 可以发现, XJ, HB, GL 粒度 0.074 mm 极性硅盐样品粉末经过一次粗选后的各样品在不同压力下产生的静电压均随压力增加而不断增大; 最大压力下 XJ, HB, GL 各样品产生

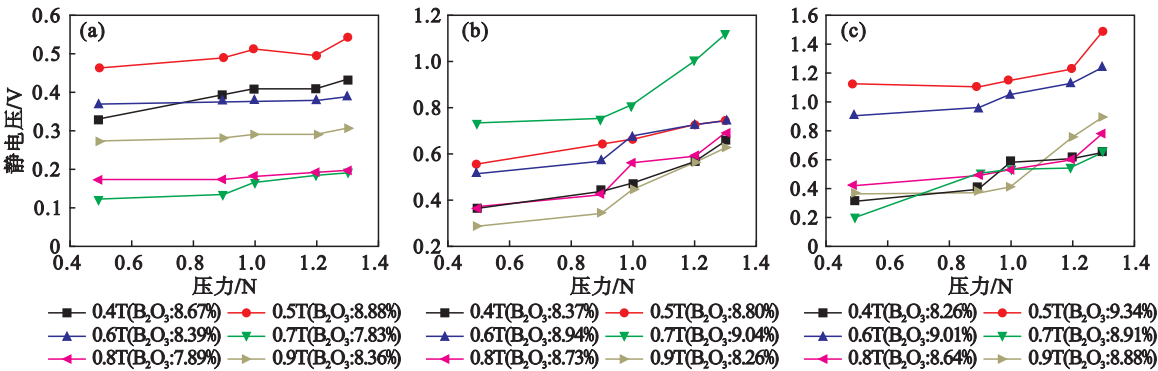


图 3 三种极性硅盐粒度 0.074 mm 粗选样品压电性测试结果
Fig. 3 Piezoelectricity test results of tourmaline (0.074 mm) at rough separation
(a)—XJ 粗选 0.074 mm; (b)—HB 粗选 0.074 mm; (c)—GL 粗选 0.074 mm.

的最大电压分别为 0.541, 1.119, 1.489 V, 精矿品位越高, 产生的静电压越大, GL 粒度 0.074 mm 各样品由于精矿品位较高, 压电性能优势明显.

图 4a ~ 4c 分别为 XJ, HB, GL 粒度 0.044 mm 极性硅盐在不同磁场强度下粗选的粉末样品压电性测试结果. 观察发现, 随着粒径变细, XJ, HB, GL 的精矿品位降低, 产生的压电静电压相比粒度 0.074 mm 粗选精矿产生的静电压有所减小, 最大值分别为 0.891, 0.842, 0.986 V, 但是仍然满足随着压力和品位的增加, 产生静电压不断增大的趋势. 图 4d ~ 4f 分别为 XJ, HB, GL 粒度 0.038 mm 极性硅盐在不同磁场强度下粗选的粉末样品压电性测试结果. 3 种样品粒度 0.038 mm 的精矿粉末产生的静电压相比粒度 0.044 mm 的静电压进一步降低, 最大值分别为 0.877, 0.839,

0.986 V, 但是仍然满足随着压力和品位的增加, 产生静电压不断增大的趋势. 由伯努利方程可知, 在标准状态下, 不同风速产生的压力可以由式 (1) 求得:

$$p_w = \frac{\rho v^2}{2}. \tag{1}$$

式中: p_w 为风压, kN/m^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为风速, m/s . 由于空气密度 ρ 和重度 γ 的关系为 $\gamma = \rho g$, 因此, 在标准状态下 (气压为 101.3 kPa, 温度为 15 °C) 空气重度 $\gamma = 0.012\,25\, \text{kN/m}^3$, 重力加速度 $g = 9.8\, \text{m/s}^2$, 可以由式 (2) 得到风压与风速的计算公式:

$$p_w = \frac{v^2}{1\,600}. \tag{2}$$

由于计算的风压力值会小于测量时设定的 0.5 ~ 1.3 N 对应的重力值, 在实际应用中可以

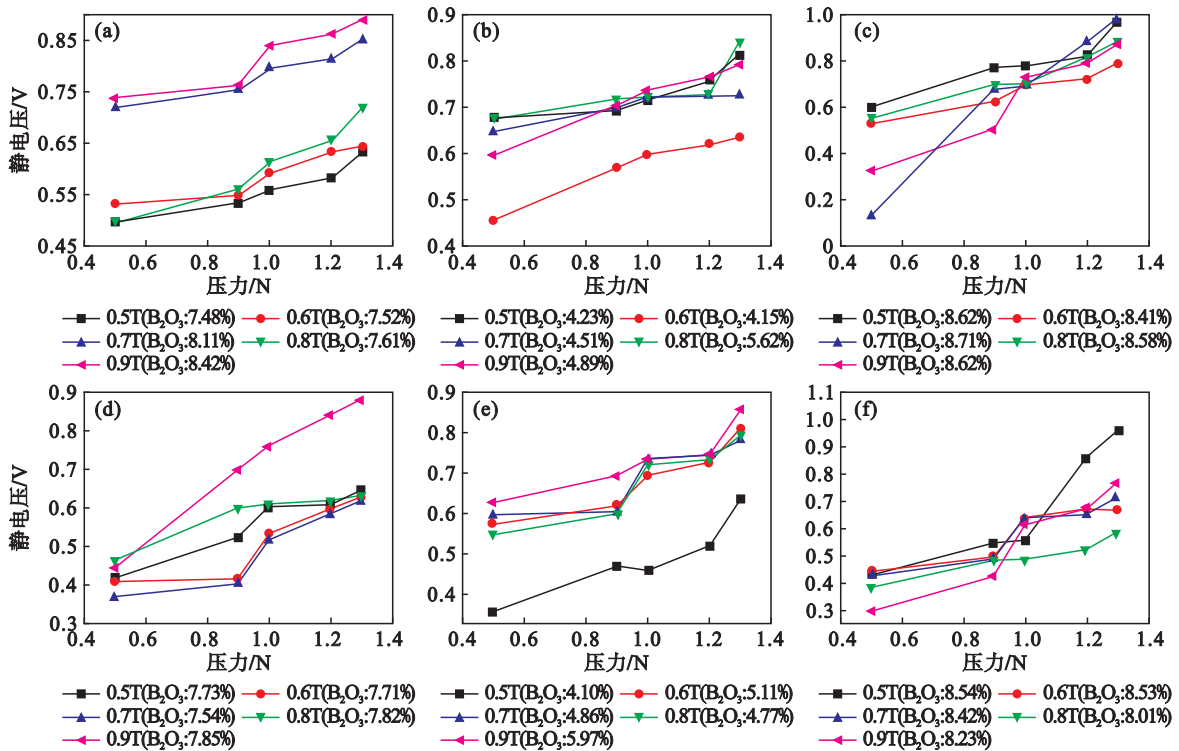


图 4 三种极性硅盐粒度 0.044 mm,0.038 mm 粗选样品压电性测试结果
Fig. 4 Piezoelectricity test results of tourmaline (0.044 mm,0.038 mm) at rough separation
(a)—XJ 粗选 0.044 mm; (b)—HB 粗选 0.044 mm; (c)—GL 粗选 0.044 mm;
(d)—XJ 粗选 0.038 mm; (e)—HB 粗选 0.038 mm; (f)—GL 粗选 0.038 mm.

根据压力与静电压趋势进行回归分析,求得固定风速下极性硅盐粉末产生的静电压值,3 种极性硅盐中,GL 粒度 0.074 mm 极性硅盐的压电性最佳.

2.2 热释电鉴别实验

Brewster 首次提出极性硅盐的“热电性”^[8],由于极性硅盐自发极化的相应变化而在晶体一定的方向上产生表面电荷.自发极化强度的变化 ΔP_s 与温度的变化 ΔT 的关系如式(3)所示,表明温度的改变会影响极性硅盐粉末的自发极化强度,进而影响极性硅盐粉末覆在滤料表面时产生的电荷量.热释电性系数是表示极性硅盐晶体粉末在温度变化条件下释放电荷的强弱程度的量,用 p 表示,单位为 $C/(m^2 \cdot K)$,测量不同极性硅盐样品的热释电性系数可以间接反映其在温度变化条件下释放电荷的强弱的能力^[9].

$$\Delta P_s = p \Delta T. \quad (3)$$

测量热释电性系数的方法中“电荷积分法”是较为简单、准确的方法,而且能满足零电场条件的测量.当温度发生变化时,热释电材料的自发极化强度 P_s 随温度的变化率 dP_s/dT 为热释电性系数^[10],见式(4):

$$p = \frac{dP_s}{dT}. \quad (4)$$

随着温度的变化,样品电极上引起的电荷表示为式(5):

$$\Delta Q_s = \int \left(A p \frac{dT}{dt} \right) dt = \int_0^{\Delta T} A p dT = A p \Delta T. \quad (5)$$

因此热释电性系数可由式(6)求得:

$$p = \frac{\Delta Q_s}{A \Delta T}. \quad (6)$$

式中: ΔT 为一定时间 t 内的温度变化, K ; A 为样品的电极表面积, m^2 ; ΔQ_s 为电荷量的改变, C . 电荷积分法的测量电路如图5所示.图中待测样品放在加热台上, C 为经过校正的反馈电容, $C = 1\,000\,pF$; 样品在加热过程中所产生的热释电电荷 ΔQ 将传输至反馈电容 C 上,故积分器的输出电压 ΔU 由式(7)求得:

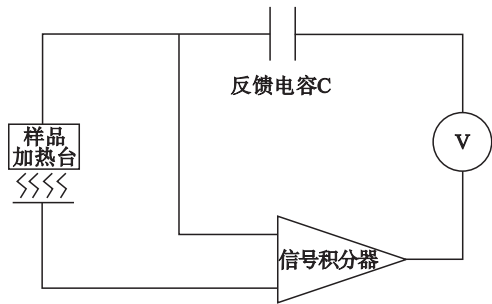


图 5 热释电性系数测试装置示意图
Fig. 5 Pyroelectric coefficient test device schematic

$$\Delta U = \frac{\Delta Q_s}{C} = \frac{Ap\Delta T}{C} \tag{7}$$

实验过程中,随着温度增加,记录电压表的输出电压,将电压随温度的变化率记为 k ,即, $k = \Delta U / \Delta T$,则热释电性系数 p 可由式(8)求得:

$$p = \frac{\Delta Q_s}{A\Delta T} = \frac{C\Delta U}{A\Delta T} = k \frac{C}{A} \tag{8}$$

式中: k 为电压随温度的变化率, V/K; C 为反馈电容, 1 000 pF; A 为样品的电极表面积, m^2 .

实验过程中,调整加热台的温度范围 30 ~ 110 $^{\circ}C$,每升高 10 $^{\circ}C$ 记录一次产生的电压,然后将每种粉末样品绘制温度 - 电压曲线,使用最小二乘法进行回归分析得到斜率 k 的值,代入式(8)得到每个样品的热释电性系数. 图 6 为以桂林粒度 0.074 mm 极性硅盐品位为 9.34% 时得到的精矿样品电压随温度变化的关系,计算得到其热释电性系数为 0.946 $\mu C / (m^2 \cdot K)$. 在磁场强度为

397.88 ~ 716.20 kA/m 时,将 XJ, HB, GL 极性硅盐粒度 0.074, 0.044, 0.038 mm 一次粗选得到的样品进行热释电性系数测试,结果见图 7.

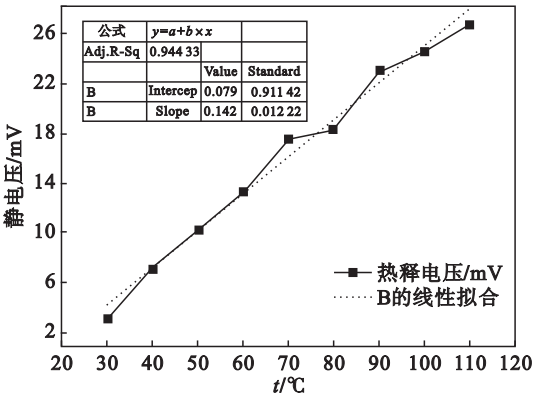


图 6 桂林粒度 0.074 mm 极性硅盐粗选精矿样品热释电压随温度变化关系 ($w(B_2O_3) = 9.34\%$)

Fig. 6 The relationship between the pyroelectric voltage and the temperature of GL tourmaline ($d=0.074\text{ mm}$, $w(B_2O_3) = 9.34\%$)

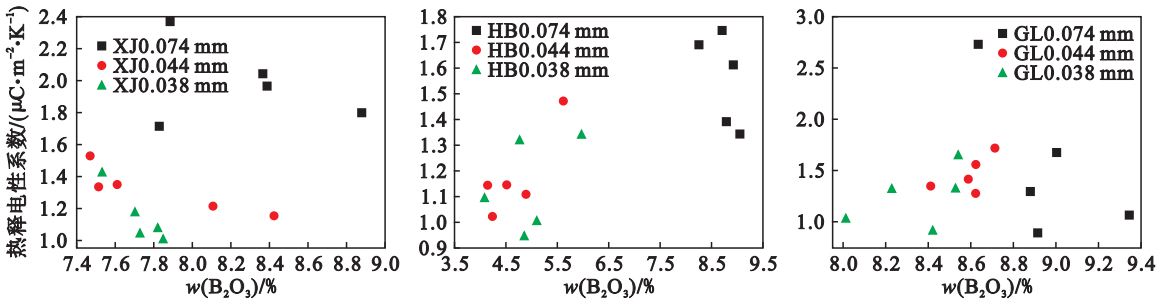


图 7 XJ, HB, GL 极性硅盐样品不同粒度热释电性系数

Fig. 7 Pyroelectric coefficients of XJ, HB, GL tourmaline with different particle sizes

由图 7 可以发现,随着粒径的减小,极性硅盐的热释电性系数均逐渐降低,即在温度变化条件下释放电荷的能力逐渐下降,每种极性硅盐不同粒径样品的热释电性系数分布分别为 XJ1.04 ~ 2.04 $\mu C / (m^2 \cdot K)$, HB 1.03 ~ 1.69 $\mu C / (m^2 \cdot K)$, GL 0.91 ~ 1.68 $\mu C / (m^2 \cdot K)$. Hawkins 等^[11]曾于 1995 年在不同的升温 and 降温速率下测试了极性硅盐晶体在 170 ~ 500 K 温度范围内的热释电性系数,实验结果表明,极性硅盐的热释电性系数为 1.8 ~ 5.4 $\mu C / (m^2 \cdot K)$,且随着温度的升高而增大,随铁含量的增加而减少.本文中测试结果偏小,分析原因为本实验中的升温速率与温度范围和前人测试不同.根据工艺矿物学分析可知,XJ, HB, GL 极性硅盐 Fe_2O_3 质量分数分别为 6.59%, 8.91%, 21.91%,对应的热释电性系数 $XJ > HB > GL$,与前人研究规律基本相符.经过综合测试比较发现,桂林粒度 0.074 mm 极性硅盐极化性能较好,产生静电压能力较强,有利于更好

地吸附滤料中的颗粒物.

3 极性硅盐对滤料过滤性能的影响

经过一系列对不同种类、不同粒度的过滤用极性硅盐样品进行极化性能鉴别实验可以发现,粒度 0.074 mm 极性硅盐的各项性能比粒度 0.044, 0.038 mm 极性硅盐更加优越,其中,粒度 0.074 mm 一次强磁选别得到的桂林极性硅盐各项性能测试表现优势明显.因此将 GL 粒度 0.074 mm 一次强磁选别得到的 6 种样品粉末粘覆在高铁空气滤料表面,并选择 HB, XJ 粒度 0.074 mm 品位最高粉末进行对照,通过对覆有极性硅盐粉末的滤料进行阻力、过滤效率测试,探究极性硅盐的鉴别优选结果以及极性硅盐对滤料的性能作用.

阻力测试风速分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m/s,过滤效率采用计重效率实验,所使用的

仪器型号为 TSI DustTrakY™ 8533,测量时取样时间为 1 min,测试风速为 0.5 m/s,粒径为 1.0, 2.5,5.0,10.0 μm ,使用滑石粉作为尘源分散,每种粉末制成 3 块样品,测 3 组上下游空气中的粒子数,并计算过滤效率的平均值作为每种粉末的计重效率.

计重效率测试结果如图 8a,8b 所示,其中 K 表示不加极性硅盐的滤料. 从图 8a 中可以得出,对于粒径为 1.0,2.5,5.0,10.0 μm 的颗粒物,覆

有极性硅盐粉末的滤料的计重效率随着颗粒物粒径的增加呈上升趋势,最高品位粉末过滤效率较高,均可以达到 80% 以上,品位越高,计重效率越高;从图 8b 可以明显看出,添加 GL,XJ,HB 三种品位最高的极性硅盐粉末滤料相比不加极性硅盐的粉末,对颗粒物的计重效率有明显提升. 阻力测试结果如图 9a,9b 所示,结果表明,随着风速的增加,阻力增幅越大,而且同一批处理的滤料的阻力基本相差不大.

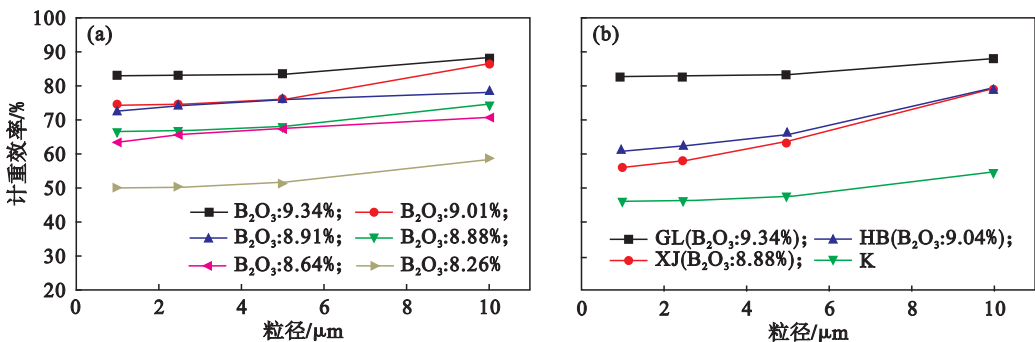


图 8 覆有极性硅盐粉末滤料计重效率实验结果
Fig. 8 Weight efficiency test results of filters covered with tourmaline powder
(a)—桂林粒度 0.074 mm 强磁样品; (b)—3 种极性硅盐样品最高品位滤料.

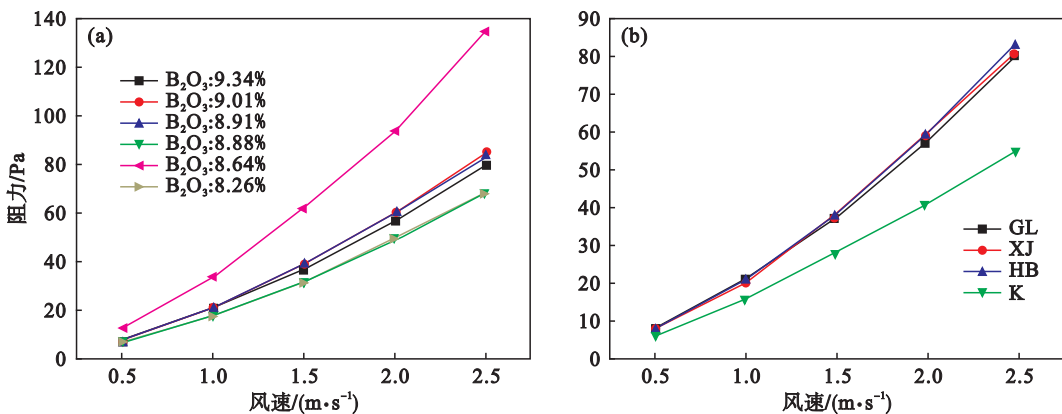


图 9 覆有极性硅盐样品阻力测试结果
Fig. 9 Resistance comparison of filter samples covered with tourmaline
(a)—桂林粒度 0.074 mm 极性硅盐样品滤料; (b)—3 种极性硅盐样品最高品位滤料.

4 理论分析

从极性硅盐独特分子结构入手探究其自发极化的原因,使用荷兰 X' PertPro 型粉末 X 射线衍射仪,将 3 种粒度 0.074 mm 极性硅盐原矿粉末进行 XRD 慢扫,实验条件:铜靶,石墨单色滤波器,工作电压 40 kV,工作电流 40 mA,扫描速度为 $2(^{\circ})/\text{min}$,将得到的峰图谱采用 Rietveld 方法精修,通过最小二乘法在建设的晶体结构模型与结

构参数的基础上,结合已知峰形函数来计算多晶衍射谱,调整这些结构参数与峰形参数使计算的多晶衍射谱与实验衍射谱相符合,从而获得晶体结构参数. 将极性硅盐晶胞中的每个配位多面体看作一个电偶极子,电极性只发生在 c 轴两端,因此可将各电偶极矩分解到 $x(a)$, $y(b)$, $z(c)$ 方向,忽略 $x(a)$, $y(b)$ 方向的电偶极矩,仅考虑 c 方向电偶极矩对晶体总电偶极矩的贡献. 根据精修得到的极性硅盐样品晶体结构,先计算每个多面体正、负电荷重心在 $z(c)$ 方向上的偏离距离

Δz ,然后根据电偶极矩计算公式求得极性硅盐 1 个晶胞中的固有电偶极矩.中心原子坐标根据表 3 中 XYZ 的值由式(9)计算得到.

$$X_{cal} = \frac{1}{n} \sum X_i; Y_{cal} = \frac{1}{n} \sum Y_i; Z_{cal} = \frac{1}{n} \sum Z_i. \quad (9)$$

中心原子与几何中心的偏移量 $\Delta z = Z - Z_{cal}$.固有电偶极矩定义为式(10),其中 p 表示电偶极矩, $C \cdot m$; q 表示每个多面体中正电荷或负电荷所带电量, C ; l 表示正负电荷之间距离,用 Δz 表示.

$$p = ql. \quad (10)$$

根据极性硅盐的晶体结构,每个晶胞中含有 3 个 X 多面体、9 个 Y 多面体、18 个 Z 多面体、18 个 T 多面体和 3 个 B 多面体,中心原子分别为

Na, Fe/Mg, Al, Si, B, 根据中心原子的化合价电荷量,其单位晶胞固有电偶极矩 p 的计算见式(11):

$$|p| = [3 \times 1 \times (\Delta z)_X + 9 \times 2 \times (\Delta z)_Y + 18 \times 3 \times (\Delta z)_Z + 18 \times 4 \times (\Delta z)_T + 9 \times 3 \times (\Delta z)_B] \times 1.6 \times 10^{-19}. \quad (11)$$

3 种极性硅盐样品的精修原子结构计算所得电偶极矩见表 3,结果表明, GL 粒度 0.074 mm 极性硅盐自发极化产生的固有电偶极矩明显高于 XJ, HB 种类样品,进一步表明极性硅盐粉末自发极化产生的电偶极矩是提高过滤效率和吸附作用的主要原因.

表 3 GL, XJ, HB 粒度 0.074 mm 极性硅盐晶体 Δz 及固有电偶极矩
Table 3 Δz and intrinsic dipole moment of tourmaline(GL, XJ, HB 0.074 mm)

样品种类	多面体结构	X	Y	Z	T	B	$p/(10^{-29} C \cdot m)$
GL	$\Delta z/nm$	0.164	-0.244	-0.244	-0.224	0.386	-36.461 7
	$p/(10^{-29} C \cdot m)$	0.492	-4.394	-13.182	-16.115	10.411	
XJ	$\Delta z/nm$	-0.414	-0.027	0.000	0.361	-0.185	30.780 15
	$p/(10^{-29} C \cdot m)$	-1.988	-0.774	-0.032	41.556	-7.982	
HB	$\Delta z/nm$	-0.351	0.281	-0.399	-0.087	0.435	-19.403 1
	$p/(10^{-29} C \cdot m)$	-1.687	8.082	-34.507	-10.067	18.775	

5 结 论

1) 经过一次强磁提纯后的 XJ, HB, GL 三种极性硅盐不同粒度粉末样品经过压电鉴别实验发现:同种极性硅盐,品位越高,产生压电性越大;不同粒度极性硅盐粉末,粒度越细,产生静电电压能力越低, GL 极性硅盐压电性能优于 XJ、HB 极性硅盐;经过热释电鉴别实验发现,粒径减小, XJ, HB, GL 3 种极性硅盐的热释电性系数均逐渐降低,经过综合测试比较发现,桂林粒度 0.074 mm 极性硅盐极化性能最优.

2) 经过一次强磁提纯后的 XJ, HB, GL 粒度 0.074 mm 极性硅盐最佳品位粉末样品附着空气滤料表面进行计重效率实验,结果表明 GL 粒度 0.074 mm 品位 9.34% 极性硅盐粉末对滤料过滤性能提升效果最显著.

3) 将 3 种极性硅盐原矿粉末进行 XRD 慢扫,通过精修得到晶体结构数据,计算得出原矿粉末自发极化产生的固有电偶极矩 GL 明显高于 XJ, HB 种类样品,证明自发极化产生的静电吸附作用是极性硅盐粉末能够提升滤料过滤性能的根本原因.

参考文献:

[1] Song S H, Kang M. Decomposition of 2-chlorophenol using a tourmaline photocatalytic system[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2008, 14(6): 785 - 791.

[2] Rakesh Y R, Xu H F. Incorporating strong polarity minerals of tourmaline with semiconductor titania to improve the photosplitting of water[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2008, 112(2): 532 - 539.

[3] Yeh J T, Hsiung H H, Wei W, et al. Negative air ion releasing properties of tourmaline/bamboo charcoal compounds containing ethylene propylene diene terpolymer/ polypropylene composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 113(2): 1097 - 1110.

[4] Dietrich R V. The tourmaline group [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985: 54 - 57.

[5] Leonard D T. Antibacterial and superhydrophilic electrospun polyurethane nanocomposite fibers containing tourmaline nanoparticles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 197(14): 41 - 48.

[6] Nakamura T, Kubo T. The tourmaline group crystals reaction with water [J]. *Ferroelectrics*, 1992, 137(1): 13 - 31.

[7] Lang S B. The history of pyroelectricity: from ancient Greece to space missions [J]. *Ferroelectrics*, 1999, 230(1): 99 - 108.

[8] Brewster D. Observation on the pyro-electricity in minerals

[J]. *Edinburgh Journal of Science*, 1824, 1(2): 208–218.

[9] Donnay G. Structural mechanism of pyroelectricity in tourmaline [J]. *Acta Crystal Lographica*, 1977, 33(6): 927–932.

[10] Hartley N P, Squire P T, Putley E H. A new method of measuring pyroelectric coefficients[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1972, 5(8): 787–789.

[11] Hawkins K D, Ian MacKinnon D R, Schneeberger H. Influence of chemistry on the pyroelectric effect in tourmaline [J]. *American Mineralogist*, 1995, 80(5/6): 491–501.

(上接第 401 页)

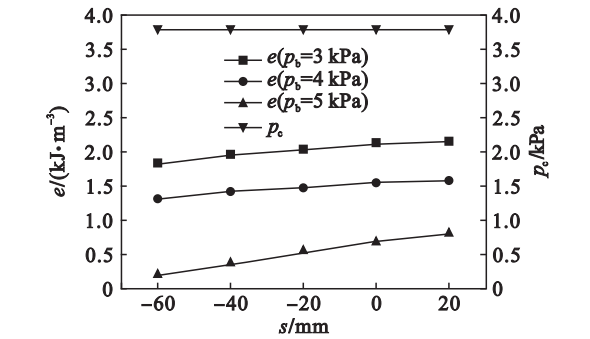


图 7 不同背压下 e, p_c 与喷嘴出口位置 s 的关系
Fig. 7 Relationship among e, p_c and s under different p_b

和 5 kPa 时 e, p_c 与喷嘴出口位置 s 的关系. 与上述分析方法相同, 当 s 从 -60 mm 增大到 20 mm 时, e 增大, 喷射泵抗背压能力增强.

3 结 语

随着喷射泵几何参数喉部直径 d 或混合室角度 θ 的减小或喷嘴出口位置 s 的增大, 都会导致喷射器喉部出口截面单位体积流体动能 e 增大、蒸汽喷射泵抗背压能力增强. 当 d, θ 及 s 变化时, e 可作为评估蒸汽喷射泵抗背压能力的标准.

参考文献:

[1] 王晓冬, 付强, 易舒, 等. 蒸汽喷射制冷系统喷射器工作特性的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(12): 1744–1747.

(Wang Xiao-dong, Fu Qiang, Yi Shu, et al. Experimental investigation of operating characteristics of ejector in steam jet refrigeration system [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2017, 38(12): 1744–1747.)

[2] Chen J, Jarall S, Havtun H, et al. A review on versatile ejector applications in refrigeration systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 67–90.

[3] Huang B J, Chang J M, Wang C P, et al. A 1-D analysis of ejector performance [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(5): 354–364.

[4] 张光利. 蒸汽喷射泵内部流场典型结构及抽气性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.

(Zhang Guang-li. Investigation on the typical structure of internal flow field and pumping performance of steam ejector [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.)

[5] 张琦, 霍杰鹏, 王汝武, 等. 蒸汽喷射器的 CFD 数值模拟及其性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 398–401.

(Zhang Qi, Huo Jie-peng, Wang Ru-wu, et al. CFD-based numerical simulation of steam ejector and its performance [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2010, 31(3): 398–401.)

[6] Pianthong K, Seehanam W, Behnia M. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(9): 2556–2564.

[7] Allouche Y, Bouden C, Varga S. A CFD analysis of the flow structure inside a steam ejector to identify the suitable experimental operating conditions for a solar-driven refrigeration system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 39(1): 186–195.

[8] Mazzelli F, Little A B, Garimella S, et al. Computational and experimental analysis of supersonic air ejector: turbulence modeling and assessment of 3D effects [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2015, 56(1): 305–316.

[9] Croquer S, Poncet S, Aidoun Z. Turbulence modeling of a single-phase R134a supersonic ejector: part 1: numerical benchmark[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 61: 140–152.

[10] del Garcí a V J, Sierra-Pallares J, Garcia C P, et al. An experimental and computational study of the flow pattern in a refrigerant ejector: validation of turbulence models and real-gas effects [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 795–811.

[11] Han Y, Wang X, Sun H, et al. CFD simulation on the boundary layer separation in the steam ejector and its influence on the pumping performance [J]. *Energy*, 2019, 167: 469–483.