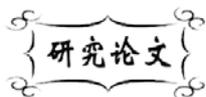


中图分类号: TQ174
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2020) 05-0294-09
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2020.05.003



高温陶瓷纤维膜材料的制备及影响因素分析

唐钰栋, 薛友祥, 程之强, 赵世凯, 张久美, 马腾飞, 李小勇, 沈鹏
山东工业陶瓷研究设计院有限公司, 山东 淄博 255000

摘要: 本文以多晶莫来石纤维、 $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ 体系结合剂为主要原料, 采用真空旋转抽滤成型工艺, 制备了高温陶瓷纤维膜材料, 研究了浆料性能、结合剂加入量、成型压力对陶瓷纤维膜材料各项性能的影响。实验结果表明: 浆料粘度、结合剂含量及成型压力对纤维膜材料的性能有显著影响。当浆料的粘度为 $2000 \text{ mPa}\cdot\text{s} \sim 2500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、结合剂含量为 $39 \text{ wt}\% \sim 42 \text{ wt}\%$ 、成型压力为 -0.04 MPa 时, 可获得均匀结构的陶瓷纤维过滤材料。材料气孔率大于 88% , 透气阻力为 82 Pa , 抗压强度为 1.75 MPa , 可几孔径为 $90 \mu\text{m}$ 。

关键词: 陶瓷纤维膜材料; 高温气体净化; 陶瓷膜; 真空抽滤

Preparation and Influence Factor Analysis of High Temperature Ceramic Fiber Membrane Materials

TANG Yu-Dong, XUE You-Xiang, CHENG Zhi-Qiang, ZHAO Shi-Kai,
ZHANG Jiu-Mei, MA Teng-Fei, LI Xiao-Yong, SHEN Peng

Shandong Industrial Ceramic Research & Design Institute Co., Ltd, Zibo 255049, China

Abstract: In this paper, high-temperature ceramic fiber membrane materials was fabricated by vacuum rotary filtration molding process using polycrystalline mullite fiber and $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$ system binder as the main raw materials. The effects of slurry performance, binder addition amount and molding pressure on the properties of ceramic fiber membrane materials were studied. It was shown that the slurry viscosity, combined with dosage and molding pressure has a significant influence on the performance of the fiber membrane material. With the viscosity of the slurry of $2000 \text{ mPa}\cdot\text{s} \sim 2500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, binder content in fiber membrane materials of about $39 \text{ wt}\% \sim 42 \text{ wt}\%$, the molding pressure of -0.04 MPa , the uniform structure of ceramic fiber filter material was obtained, with porosity greater than 88% , breathable resistance of 82 Pa , compressive strength of 1.75 MPa and the most probable pore size of $90 \mu\text{m}$.

Keywords: Ceramic fiber membrane material; High temperature gas filtration; Ceramic membrane; Vacuum suction filter

收稿日期: 2019-11-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0310403); 2016年度泰山产业领军人才。

第一作者: 唐钰栋 (1987-), 男, 甘肃天水人, 工程师。E-mail: tanyudon@126.com。

通讯作者: 张久美 (1989-), 女, 山东临沂人, 工程师。E-mail: 704281653@qq.com。

陶瓷膜材料具有过滤效率高、热稳定性好等优点，在热气体净化领域具有广阔的应用前景。以高温陶瓷膜材料为核心的陶瓷膜高温过滤技术为国际公认的 21 世纪热气体净化的一个发展方向。其中，陶瓷膜材料作为高温陶瓷膜过滤技术的核心^[1-4]，近年来也得到广泛发展。目前已发展的高温陶瓷膜材料主要包括颗粒堆积的高强度陶瓷膜材料以及低密度陶瓷纤维膜材料^[5-9]，其中陶瓷纤维膜过滤材料具有体积密度小、过滤阻力低、热稳定性好等优点，是一种最理想的高温烟气净化用陶瓷过滤材料，可广泛应用于冶炼、垃圾焚烧、建材等领域，具有较大的应用市场。

围绕陶瓷纤维膜材料的开发，国外已发展了多种制备工艺^[10,11]，主要包括短纤维抽滤成型工艺和连续纤维编制和缠绕工艺，其中连续纤维编织和缠绕工艺受制于连续纤维的种类和价格，制造成本相对较高，大面积推广有一定难度。短纤维抽滤成型制品具有孔隙率高、过滤阻力小、成本低、制备工艺简单、便于大尺寸生产等优点，是目前国内外主要发展的纤维膜材料制备工艺之一。德国 BWF 环境技术有限公司、英国 Clado 工程公司、英国 Tenmat 公司、德国 Schumacher 公司、德国 Clear Edge Filtrtion 公司等均采用这种工艺开发了气孔率 80% 以上、过滤阻力小于 200 Pa、使用温度高于 500°C 的陶瓷纤维膜材料^[12,13]。其中，英国 Tenmat 公司、德国 Clear Edge Filtrtion 公司的产品已进入中国市场，在我国玻璃、垃圾焚烧等领域得到应用。

目前国内发展的高温陶瓷过滤材料是以颗粒堆积原理制成的陶瓷膜材料为主，产品阻力大以及成本高是制约产品应用推广的主要原因之一。在陶瓷纤维过滤材料方面上，产品的均一性、机械强度和耐冲刷性能方面也存在一定问题，导致产品在使用过程中出现断裂、使用寿命短等方面，严重影响了其在国内的推广应用。国内目前应用的陶瓷纤维膜材料主要依赖进口。

本文以莫来石纤维为主要原料，采用真空旋转抽滤成型工艺，开展了高温陶瓷纤维膜材料的制备工艺研究，探讨了结合剂量、浆料黏度、成型压力对陶瓷纤维膜材料孔径分布、气孔率，抗压强度，透气阻力性等性能的影响，确定了较优的工艺参数。

1 实 验

1.1 原料及设备

本研究以莫来石纤维为主要原料，硅溶胶（酸性、固相含量 30 wt%）、硼酸及氧化硼为复合高温结合剂，以羧甲基纤维素为有机结合剂，采用旋转真空抽滤工艺制备陶瓷纤维膜材料。表 1 列出了实验所用的原料，表 2 列出了浆料控制、陶瓷纤维膜材料制备及性能测试过程中所用的设备及装置。

1.2 实验过程

实验采用旋转真空抽滤成型工艺制备陶瓷纤维膜材料，工艺流程如图 1 所示。

表 1 实验原料
Table 1 Experimental materials

Raw material	Manufacturers	Purity
Mullite fibre	Zhejiang Hongda Crystal Fiber Co. LTD	98%
Boric acid	Tianjin Jiangtian Chemical Technology Co. LTD	Analysis pure
Silica sol	Tianjin Jiangtian Chemical Technology Co. LTD	Analysis pure
Boron oxide	Tianjin Yantong Plastic Auxiliary Chemical Co. LTD	Industrial pure
Carboxymethyl cellulose	Shanghai Hengxin Chemical Reagent Co. LTD	Industrial pure

表 2 实验主要设备
Table 2 Instruments for experiments

The instrument	Model	Manufacturers
Electronic scale	TCS-YH-A 100 kg	Jiangsu Yingheng Weighing Equipment Manufacturing Co. LTD
Vertical mixing and dispersing machine	EBJ	Shanghai Yile Electromechanical Equipment Co. LTD
Aperture analyzer	BSD-PB	Beiside Instrument Technology (Beijing) Co., LTD
Rotary viscosimeter	NDJ-5s	Shanghai Precision Instrument Co. LTD
Electronic balance	PL-203	Mettler Toledo
Electronic universal testing machine	CMT4304	Mester Industrial Systems (China) Co., LTD
X ray diffractometer	D/max2500v/pc	Rigaku, Japan
Scanning electron microscope	Model S-4800	Hitachi, Japan
Vacuum pump	RA0063F	Wuxi Lyman Vacuum Equipment Co. LTD
Filter forming device	Homemade	

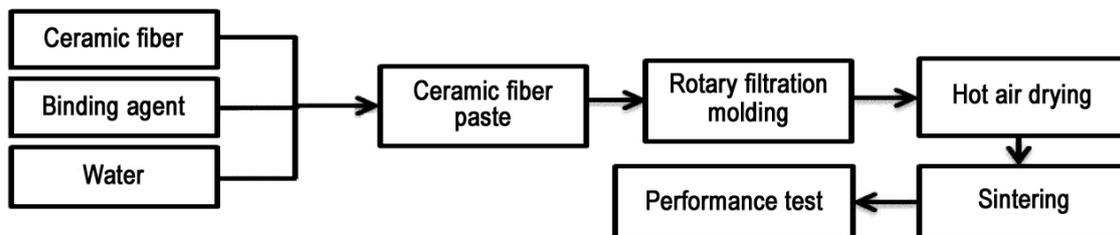


图 1 陶瓷纤维膜材料制备工艺流程
Figure 1 Preparation process for the ceramic fiber membrane material

以莫来石纤维 (图 2) 为主要原料, 硅溶胶、硼酸及氧化硼做结合剂、羧甲基纤维素 (分子量 1000) 为成型助剂, 开展纤维膜材料制备工艺研究。首先按照一定比例将硼酸、硅溶胶、氧化硼、羧甲基纤维素、水搅拌均匀, 然后外加 1 wt% 莫来石纤维, 通过高速搅拌制成均匀分散的纤维膜浆料, 然后将浆料倒入成型装置中, 经负压旋转抽滤成型, 制得的坯体经 80°C 烘干 36 h 后脱模, 最后在 1000°C 下保温时间 5 h 进行热处理即得到最终样品 (图 3)。

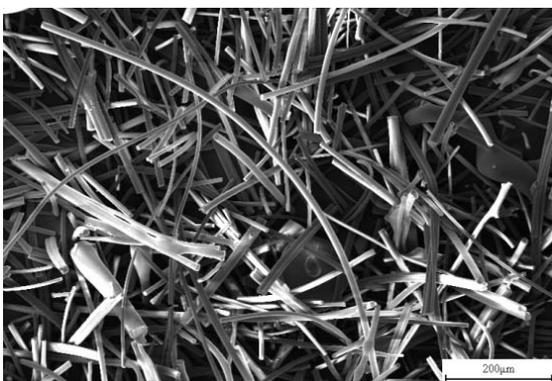


图 2 莫来石陶瓷纤维 SEM 照片
Figure 2 SEM micrograph of mullite fiber

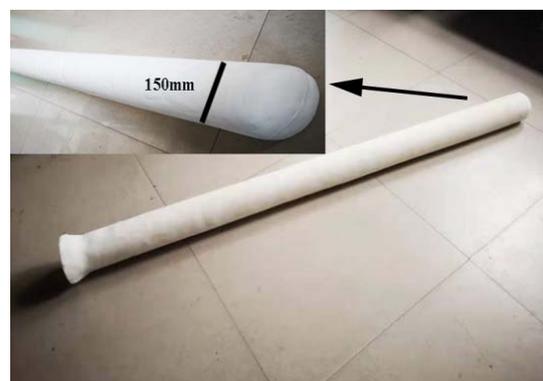


图 3 陶瓷纤维膜材料
Figure 3 Ceramic fiber membrane material

1.3 性能测试

采用电子万能试验机进行抗压强度测试；采用日本 Rigaku 公司 D/max2500v/pc 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析试样所含物相；采用日本 Hitachi 公司 S-4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品断面微观形貌；采用贝士德仪器科技 (北京) 有限公司 BSD-PB 孔径分析仪测试试样孔径分布；采用上海精密仪器仪表有限公司 NDJ-5s 旋转粘度计测试浆料的粘度。

表 3 纤维膜材料结合剂配方
Table 3 Binder formula of fiber membrane material

Serial number	Silica sol / wt%	Boric acid / wt%	Boron oxide / wt%
1#	5	3	1.5
2#	10	3	1.5
3#	15	3	1.5
4#	20	3	1.5

2 结果与讨论

2.1 结合剂对膜材料性能影响

以多晶莫来石纤维为原料，按照表 3 列出的硅、硼结合剂配方配制了 4 份纤维膜浆料，浆料粘度控制为 1000 mPa·s，在 -0.04 MPa 下抽滤成型制备纤维膜材料，结合剂配方体系中硼含量保持不变，研究了纤维膜浆料中硅溶胶加入量对试样气孔率、透气阻力、孔径分布、抗压强度及显微结构的影响。

图 4 示出了纤维膜浆料中硅溶胶含量对纤维膜材料的气孔率和透气阻力 (1 m/min、壁厚 20 mm) 的影响。由图可知，随着结合剂中硅溶胶量的增加，相同烧结温度下纤维膜材料的气孔率逐渐减小，透气阻力逐渐增大。当浆料中硅溶胶加入量为 5 wt% 时，气孔率为 90%，透气阻力最小为 73 Pa；当硅溶胶含量为 20 wt% 时，气孔率降低至 85%，透气阻力则提高至 120 Pa。这可能是因为随着硅溶胶含量增加，一方面结合剂烧结温度提高，另一方面可能会有过多的硅溶胶颗粒填充在纤维膜材料的孔隙中，造成气孔率降低，透气阻力增大。

图 5 给出了硅溶胶含量对纤维膜材料孔径分布的影响。由图可知，随着纤维膜浆料中硅溶胶量的增加，纤维膜材料孔径分布有显著变化。当硅溶胶的量为 5 wt% 时，分布曲线存在多个峰，每个

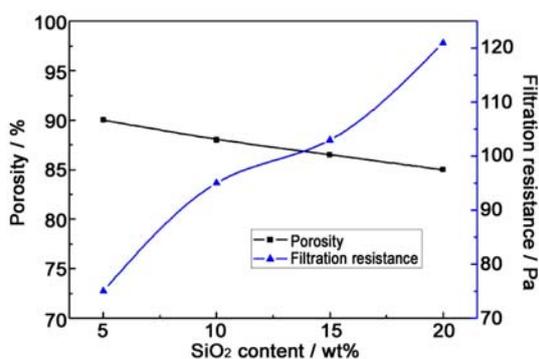


图 4 硅溶胶量对气孔率和透气阻力的影响
Figure 4 Influence of silica sol amount on porosity and permeability

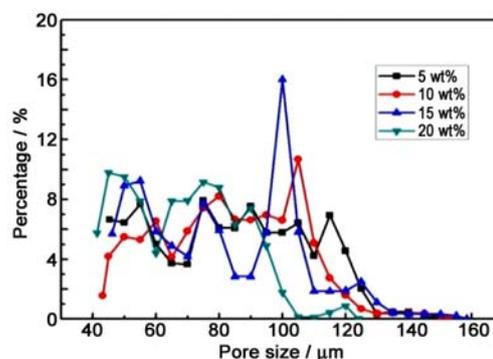


图 5 硅溶胶量对孔径分布的影响
Figure 5 Influence of silica sol amount on pore diameter distribution

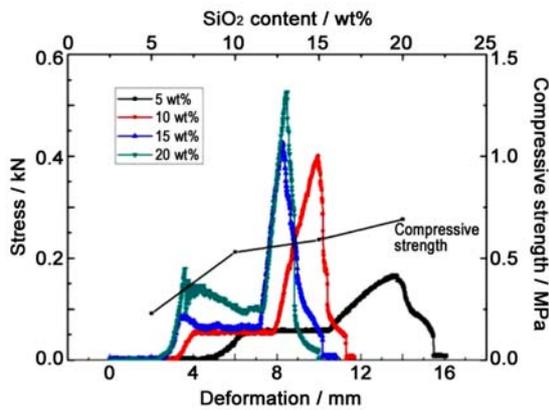


图 6 硅溶胶加入量对样品抗压强度和应力-应变曲线的影响

Figure 6 Effect of silica sol amount on compressive strength and stress-strain curves of samples

峰值占比相差不多, 孔径主要分布在 $44\ \mu\text{m} \sim 160\ \mu\text{m}$ 之间, 可几孔径为 $78\ \mu\text{m}$; 当硅溶胶的量增加至 $10\ \text{wt}\%$ 时, 孔径分布曲线在 $100\ \mu\text{m} \sim 110\ \mu\text{m}$ 之间存在较高峰, 峰值为 11% , 孔径分布范围为 $42\ \mu\text{m} \sim 152\ \mu\text{m}$, 可几孔径为 $105\ \mu\text{m}$; 当硅溶胶的量为 $15\ \text{wt}\%$ 时, 孔径分布曲线在 $90\ \mu\text{m} \sim 110\ \mu\text{m}$ 出现最高峰, 峰值为 16% , 孔径分布范围未有明显变化, 为 $45\ \mu\text{m} \sim 160\ \mu\text{m}$, 可几孔径 $100\ \mu\text{m}$, 相比于前者明显减小。硅溶胶量继续增加到 $20\ \text{wt}\%$ 时, 孔径分布曲线向左偏移, 且峰值变小, 孔径分布范围变窄, 为 $42\ \mu\text{m} \sim 125\ \mu\text{m}$, 可几孔径为 $47\ \mu\text{m}$ 。由此可知, 纤维膜材料的孔径分布较宽, 且存在多个峰, 分析其原因可能是陶瓷纤维的长径比分布宽, 导致纤维

搭接的孔径差异较大。浆料中硅含量对陶瓷纤维膜材料孔径分布有显著影响, 当硅溶胶含量为 $10\ \text{wt}\%$ 和 $15\ \text{wt}\%$ 时, 孔径分布较为均匀。

图 6 给出了浆料中硅溶胶量对纤维膜材料抗压强度及应力-应变曲线的影响。可以看出, 浆料中硅溶胶的量对纤维膜材料力学性能有显著影响。随着硅含量的增加, 纤维膜材料抗压强度逐渐升高, 当硅溶胶的量为 $5\ \text{wt}\%$ 时, 纤维膜材料的抗压强度只有 $0.25\ \text{MPa}$; 硅溶胶量为 $10\ \text{wt}\%$ 时, 抗压强度为 $0.5\ \text{MPa}$; 随着硅含量的继续增加, 抗压强度升高至 $0.6\ \text{MPa}$; 当硅溶胶量为 $20\ \text{wt}\%$, 抗压强度提升较不明显, 仅为 $0.7\ \text{MPa}$ 。从应力-应变曲线可知, 纤维膜材料刚开始受到压应力时, 试样发生弹性变形; 当超过屈服点后, 纤维膜材料开始发生塑形变形, 直到纤维膜材料达到抗压强度极限。

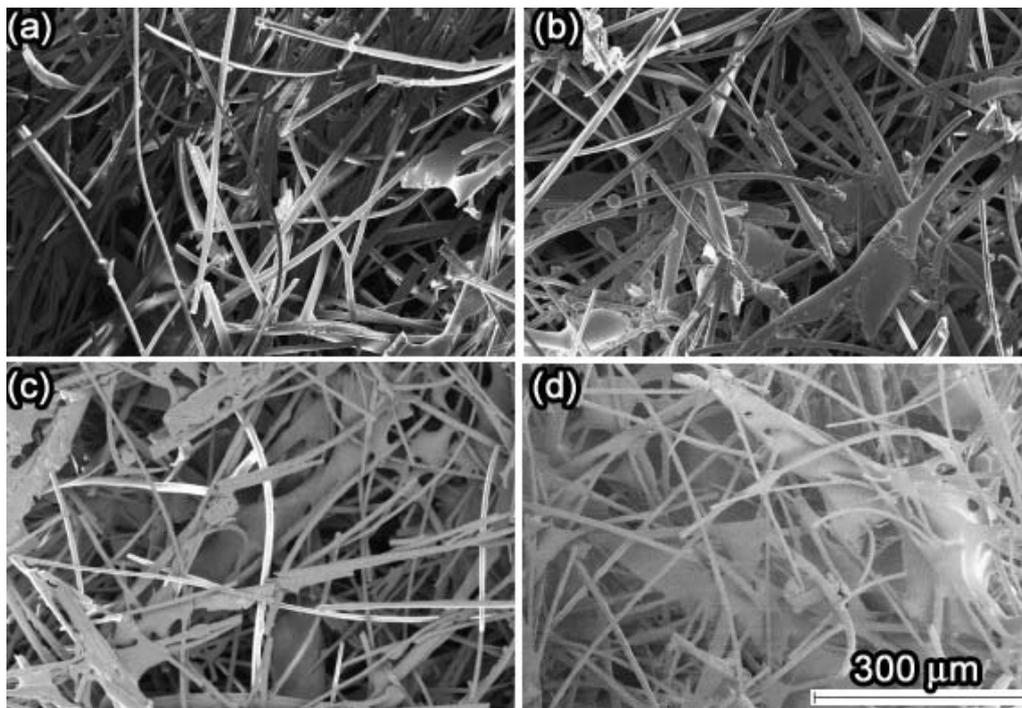


图 7 陶瓷纤维膜材料 SEM 图

Figure 7 SEM micrographs of ceramic fiber membrane material

由实验结果可知,随着浆料中硅溶胶量的增加,纤维膜材料的强度极限明显升高,即从 0.15 KN 升高 0.54 KN,当硅溶胶量为 10 wt% 和 15 wt% 时,纤维膜材料的强度极限值为 0.4 KN 和 0.43 KN,两者差别较小。当硅溶胶量为 5 wt%、10 wt% 和 15 wt% 时,纤维膜材料的屈服强度并无明显变化,值为 0.05 KN。但当纤维膜浆料中硅含量为 20 wt% 时,屈服强度有明显升高,为 0.1 KN。

图 7 为浆料中不同硅溶胶量对纤维膜材料显微结构的影响,由图可知,硅溶胶量对纤维膜材料的微观结构有显著影响。当硅溶胶量仅为 5 wt% 时 [图 7 (a)],纤维膜材料中结合剂较少,纤维结点处几乎无结合剂,显微结构中存在较大直径孔隙;当硅溶胶的量提升至 10 wt% 时 [图 7 (b)],纤维膜材料中显微结构均匀,无明显直径较大的孔隙,结合剂量略有增加,纤维膜结点处出现结合剂;随着硅溶胶的量再增加,即为 15 wt% 时 [图 7 (c)],纤维膜材料中结合剂的量明显增加,纤维间结合剂量明显增加,显微结构较为均匀,孔隙和孔隙直径都略有减少,但孔隙大小较为均匀。当硅溶胶的量增加至 20 wt% 时 [图 7 (d)],显微结构不均匀,局部存在纤维间结合剂量较多,纤维间孔隙较小甚至消失,整体的孔隙和孔隙直径都明显减少。上述实验结果表明,随着硅溶胶量的逐渐增加,结合剂量逐渐增多,造成纤维膜材料的孔隙逐渐较少,孔隙结构也由孔隙直径较大且分布不均匀,到孔隙直径减小且分布均匀,最后孔隙直径剧减且分布不均匀,上述变化规律与图 3、图 4、图 5 中性能变化相一致。

表 4 纤维膜材料浆料配方
Table 4 Fiber film material sizing formula

Serial number	Silica sol / wt%	Boric acid / wt%	Boron oxide / wt%	Cellulose / wt%	Fiber / wt%	Water / wt%
1#	10	3	1.5	0.25	1	86.75
2#	10	3	1.5	0.50	1	86.50
3#	10	3	1.5	0.75	1	86.25
4#	10	3	1.5	1.00	1	86.00
5#	10	3	1.5	1.25	1	85.75

2.2 浆料黏度对结合剂负载量影响

按照表 4 所示配方配制 5 份纤维膜浆料,在 -0.04 MPa 下抽滤成型纤维膜材料,在纤维膜浆料中结合剂量一致的情况下,研究浆料粘度对成型后纤维表面负载结合剂量的影响规律。浆料粘度主要通过调整纤维素加入量来控制。

图 8 为浆料粘度和纤维膜材料结合剂含量随纤维素添加量 (0.25 wt%、0.5 wt%、0.75 wt%、1 wt%、1.25 wt%) 的变化曲线。由图可知,随着纤维素添加量逐渐增多,纤维膜浆料的粘度明显增大,从 215 mPa·s 增大至 2461 mPa·s。纤维膜材料中结合剂负载量随着浆料粘度的增加呈先快速增加后趋于平缓的趋势。图 8 表明:当纤维素的添加量为 1 wt%~1.25 wt% 时,纤维浆料粘度为 2000 mPa·s~2500 mPa·s,而此时纤维膜材料制品中结合剂负载量为 39 wt%~42 wt%。出现上述现象的原因可能为:随着浆料黏度的增加,粘附在纤维表面及结点处的结合剂量也逐渐增多,当结合剂量达到饱和时,剩余的结合剂会被抽出,导致结合剂负载量保持在一定范围内不再升高。

2.3 成型压力对膜材料性能影响

以莫来石纤维为原料,硅溶胶的量为 10 wt%,浆料粘度控制在 2000 mPa·s~2500 mPa·s,研究了抽滤成型压力对纤维膜材料气孔率、透气阻力、抗压强度、孔径分布的影响。

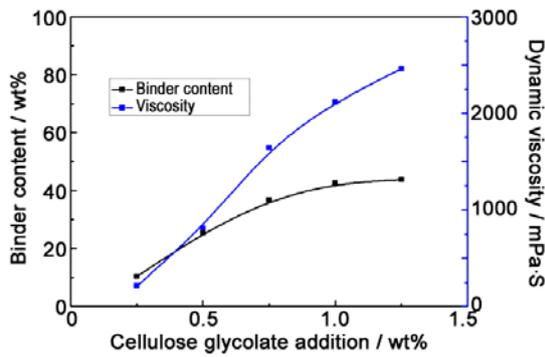


图 8 纤维素添加量对浆料粘度及结合剂含量的影响
Figure 8 Influence of cellulose content on slurry viscosity and binder content

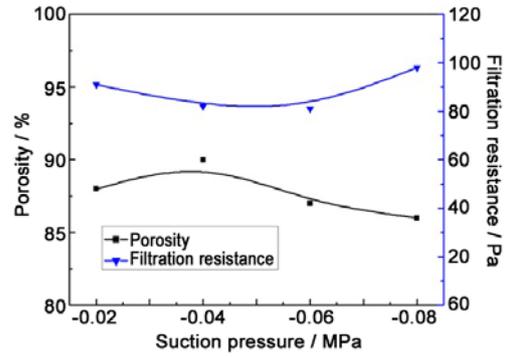


图 9 抽吸压力对气孔率和透气阻力的影响
Figure 9 Influence of suction pressure on porosity and permeability

图 9 给出了抽滤成型压力 (分别为 -0.02 MPa、 -0.04 MPa、 -0.06 MPa、 -0.08 MPa) 对纤维膜材料的气孔率和透气阻力 (1 m/min、壁厚 20 mm) 的影响。可以看出, 在 -0.02 MPa ~ -0.08 MPa 抽吸压力作用下, 透气阻力呈现先减小后趋于平缓然后升高的趋势。当抽吸压力在 -0.04 MPa ~ -0.06 MPa 时, 透气阻力在 80 Pa 左右浮动; 随着抽吸压力继续增加, 陶瓷纤维膜材料的透气阻力也随之增加, 当抽吸压力为 -0.08 MPa 时, 透气阻力增加至 98 Pa。此外, 随着抽吸压力的增加, 气孔率呈现先增加后较小的趋势, 在 -0.04 MPa 抽吸压力下气孔率最高, 为 88%, 在 -0.08 MPa 抽吸压力下气孔率最低, 值为 86%。出现上述结果的主要原因可能是: 当抽吸压力为 -0.02 MPa 时, 大量的结合剂停留在孔道内部, 导致气孔率和透气阻力略有增加; 随着抽吸压力逐渐增加, 大量的结合剂被抽出, 未停留在孔道内部; 但由于抽吸压力过大, 造成纤维之间贴合更加紧密, 气孔率明显减小, 透气阻力明显增加。

图 10 给出了不同抽吸压力 (分别为 -0.02 MPa、 -0.04 MPa、 -0.06 MPa、 -0.08 MPa) 对纤维膜材料孔径分布的影响。可以看出, 随着抽滤成型压力的增大, 纤维膜材料的孔径分布范围及可几孔径发生明显变化, 可几孔径呈现出先增大后减小的趋势。当抽吸压力为 -0.02 MPa 时, 孔径分布曲线存在多个峰, 且峰值较低, 孔径分布范围在 $40 \mu\text{m}$ ~ $110 \mu\text{m}$ 之间, 可几孔径为 $50 \mu\text{m}$; 抽吸压力增加至 -0.04 MPa 时, 孔径分布峰减少, 且在 $70 \mu\text{m}$ ~ $100 \mu\text{m}$ 间峰值最高, 孔径主要分布在 $49 \mu\text{m}$ ~ $120 \mu\text{m}$, 其可几孔径变大为 $90 \mu\text{m}$, 在 $100 \mu\text{m}$ ~ $120 \mu\text{m}$ 间存在峰值很低的峰, 即存在少量缺陷孔;

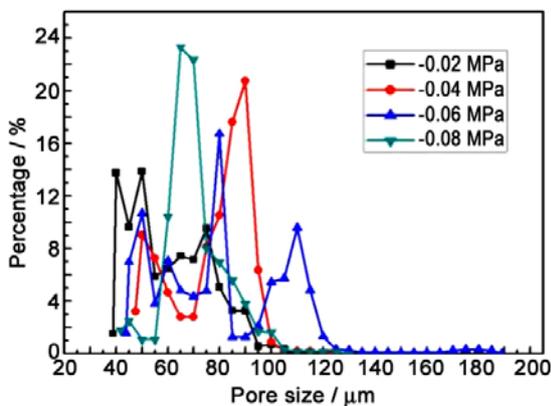


图 10 抽吸压力对孔径分布的影响
Figure 10 Influence of suction pressure on aperture distribution

随着抽吸压力继续增加, 孔径分布峰较多, 分布范围变大, 在 $75 \mu\text{m}$ ~ $85 \mu\text{m}$ 有较高峰, 在 $130 \mu\text{m}$ ~ $190 \mu\text{m}$ 有峰值极低的峰, 孔径分布范围为 $44 \mu\text{m}$ ~ $190 \mu\text{m}$, 可几孔径为 $80 \mu\text{m}$, 在 $130 \mu\text{m}$ ~ $190 \mu\text{m}$ 存在少量缺陷孔; 当抽吸压力提高至 -0.08 MPa 时, 膜材料的分布峰减少, 峰值增加, 孔径分布整体向左偏移, 分布范围为 $41 \mu\text{m}$ ~ $130 \mu\text{m}$, 其可几孔径为 $65 \mu\text{m}$ 。上述实验结果与图 9 中抽吸压力对透气阻力和气孔率的影响相对应。

图 11 给出了抽滤成型压力对纤维膜材料抗压强度及应力-应变的影响。由图可知, 成型压力对纤维膜材料的力学性能有较大影响。随着抽

滤成型负压的提高,纤维膜材料的抗压强度呈先升高后下降的趋势,当成型压力为 -0.04 MPa 时,膜材料的抗压强度最大,值为 1.75 MPa。随着抽吸负压继续增加,过多结合剂被抽出,纤维间连接点减少,导致制品抗压强度逐渐降低。当抽吸压力为 -0.08 MPa 时,抗压强度最低,仅为 0.9 MPa。从应力-应变曲线可知,随着成型压力的增加,纤维膜材料的弹性极限和屈服强度并没有发生明显变化,主要在 0.06 kN ~ 0.08 kN 范围内,但抗压强度极限呈现出先增大后减小的趋势,当抽吸压力为 -0.04 MPa 时,抗压强度极限达到最大,为 0.4 kN。

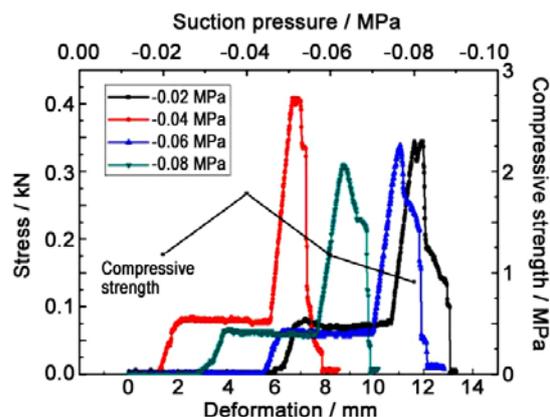


图 11 抽吸压力对试样抗压强度及应力-应变曲线的影响

Figure 11 The influence of suction pressure on compressive strength and stress-strain curve

3 结 论

(1) 以莫来石纤维为主要原料、硼酸、硅溶胶、氧化硼为复合结合剂,用羧甲基纤维素调整浆料粘度,采用旋转真空抽滤工艺,经烘干、烧成 (1000°C),制备了陶瓷纤维膜材料。当浆料粘度为 2000 mPa·s ~ 2500 mPa·s、纤维膜材料中结合剂含量为 39 wt% ~ 42 wt%、成型压力为 -0.04 MPa 时,可获得均匀结构的陶瓷纤维过滤材料。

(2) 结合剂中硅溶胶的加入量对纤维膜材料各项性能有较大影响。随着浆料中硅溶胶量增加,纤维膜材料的透气阻力逐渐增大,气孔率逐渐下降,抗压强度逐渐高,可几孔径呈先增大后减小的趋势。研究表明:当浆料中硅溶胶量控制在 10 wt% ~ 15 wt% 时,纤维膜材料的显微结构均匀,气孔率大于 87% 、抗压强度大于 0.5 MPa,透气阻力为 95 MPa ~ 103 Pa,可几孔径为 100 μm ~ 105 μm 。

(3) 浆料粘度对纤维膜材料中结合剂有显著影响。随着浆料中纤维素含量提高,浆料粘度逐渐增大,成型纤维膜材料中结合剂含量呈现先快速增加,后趋于平缓的趋势。分析表明,当纤维素的添加量为 1 wt% ~ 1.25 wt% 时,浆料的粘度为 2000 mPa·s ~ 2500 mPa·s,此时纤维膜材料中结合剂含量为 39 wt% ~ 42 wt%。

(4) 抽滤成型压力对纤维膜材料的气孔率、透气阻力、抗压强度及孔径分布有显著影响。随着抽吸压力的增加,纤维膜材料的气孔率先增大后减小,透气阻力先减小后增加,抗压强度先增加后减小,可几孔径呈先增大后减小。分析表明,当抽吸压力为 -0.04 MPa 时,纤维膜材料的性能较优,其气孔率为 88% ,透气阻力为 82 Pa,抗压强度为 1.75 MPa,孔径分布主要分布为 49 μm ~ 120 μm ,可几孔径为 90 μm 。

参考文献

- [1] 高铁瑜. 先进燃煤联合循环陶瓷过滤器研究[D]. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 2003.
- [2] 尹建威, 况春红, 高征恺, 等. 氧气高炉煤气高温除尘中间试验[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24 (1): 19–21.
- [3] 田贵山, 马振吉. 气体在陶瓷过滤器元件内流动研究[J]. 淄博学院学报, 2000, 2 (4): 40–45.
- [4] 江培秋, 马桂红, 王莹, 等. 陶瓷分离膜材料制备工艺[J]. 现代技术陶瓷, 2003, (3): 33–36.
- [5] 胡动力, 曾令可, 刘平安, 等. 陶瓷纤维过滤器的应用[J]. 陶瓷, 2007, (9): 4–6.
- [6] 王耀明, 薛友祥, 孟宪谦, 等. 孔梯度陶瓷纤维复合膜管的性能研究[J]. 陶瓷, 2006, 10: 36–38.

- [7] 许珂敬, 孟凡涛, 李国昌, 等. 陶瓷过滤器材料及其制备技术进展[J]. 山东工程学院学报, 2002, 16 (3): 62-67.
- [8] 徐超, 徐艺冬, 金江. 高温气体净化用纤维过滤材料的性能[J]. 硅酸盐通报, 2004, (6): 1314-1318.
- [9] 梁振江, 邓辉, 张杰, 等. 陶瓷纤维在高温烟气过滤中的应用[J]. 山东纺织科技, 2016, (6): 44-46.
- [10] ALVIN MA. Advanced second generation ceramic candle filters [R]. DOE/NETL Contract No. AC21-94MC31147. USA, Pittsburgh: Siemens Westinghouse Power Corporation, 2002.
- [11] WITHERS CJ, WEST AA. Improvement in the performance of ceramic media for filtration of hot gases [J]. Filtration and Separation, 1990, 27 (1): 32-37.
- [12] ALVIN MA. Advanced ceramic materials for use in high-temperature particulate removal systems [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996, 35 (10): 3384-3398.
- [13] CLIFT R, SEVILLE JPK. Gas Cleaning at High Temperatures[M]. Switzerland: Springer, 1993.