

李国锋*, 王志强

(大连理工大学 静电与特种电源研究所, 辽宁 大连 116024)

关键词: 静电场; 粒子链; 陶瓷纤维

中图分类号: TQ340.43 文献标志码: A

0 引言

为主要聚集形态,那么对于制备功能微细纤维以及纤维结构陶瓷材料有很重要的意义.

Kasper 等利用火焰产生的 Fe_2O_3 气溶胶粒子进行了实验研究,粒子的粒径范围在几十纳米,实验结果表明通过控制燃烧气体成分和气溶胶粒子浓度,粒子链聚集体是可以控制形成的^[4]. Yamamoto 和 Masuda^[5,6]首先进行了利用静电力控制微细粒子的聚集形态制作陶瓷多孔膜的实验研究,微细粒子来源于化学气相沉积法(chemical vapor deposition method, CVD)生成的 Si_3N_4 粒子,平均粒径为 70 nm. Si_3N_4 粒子在静电场作用下形成了粒子链沉积在基材表面,在 1 200 °C 烧结后,得到了三维网络结构的多孔陶瓷膜,有效孔径在 0.2~1.0 μm . 在上述两位学者之后, Su 等^[7]将硅溶胶水溶液雾化,雾化过程中硅溶胶颗粒被荷上电荷,在静电力的作用下沉积在玻璃基材表面,再经 500 °C 加热,最后得到了网状结构的 SiO_2 膜.

上述文献研究中微细粒子的产生过程复杂,如果直接利用商品微细粒子将会使整个工艺过程简化. Dascalescu 等对粒子链的形成过程进行了

研究^[8],认为在静电场作用下,单一的粒子链可以从金属粒子和过渡金属氧化物粒子中产生,粒子的直径应该小于 1.25 mm. Leung 等^[9]用 100 nm 的金粒子,利用电场作用在两个微结构电极间形成了金粒子链,并制成了微细导电纤维.因此利用商品微细粒子控制形成粒子链是可行的,如果把文献[4~7]中粒子的来源换成商品微细粒子,同样应该会得到三维网状结构的多孔陶瓷,而工艺过程会得到简化.

基于以上思路,本文利用气相分散后的微细 Al_2O_3 粉体粒子,考察其在静电场作用下的聚集行为,并对粒子链状聚集体的形成机制进行讨论.设计的工艺过程为微细 Al_2O_3 粉体粒子(购买)—充分分散到沉积空间—静电场作用—粒子重新聚集以粒子链形式沉积—烧结—纤维型多孔陶瓷,过程中所使用的粒子来源于对粉体的气相分散,在实际应用中更具有实用性.

1 实验方法

实验装置如图 1 所示.实验中电极结构为金属针对金属筛网和金属针对 Al_2O_3 基材($10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$),电极之间的距离保持在 2 cm,高压电极上施加的是正极性高压直流电.

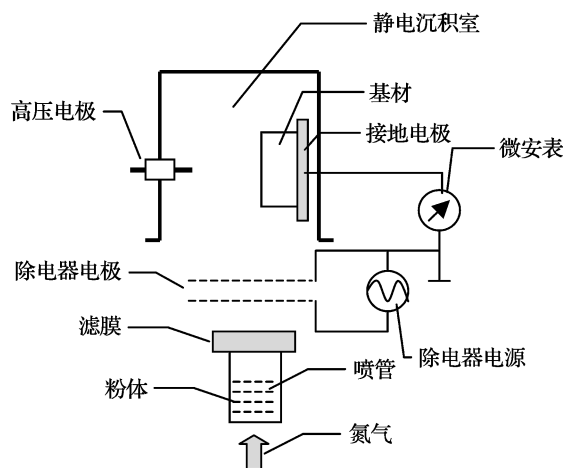


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Sketch map of experimental setup

静电场控制粒子的聚集行为是利用分散在气相中的具备一定浓度的介电性微细粉体粒子为原料,在静电梯度场作用下,气相中的微细粒子以粒

子链凝聚体为主要凝聚形态,沉积在基材表面形成三维网状结构附着层,再经过烧结工艺获得纤维质多孔陶瓷材料.

本文实验中将微细 Al_2O_3 粉体作为实验材料, Al_2O_3 粉体粒子的平均粒径为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ (大连沈联化学试剂玻璃仪器有限公司提供).将微细的 Al_2O_3 粉体粒子分散到周围的气体中是本文的重要操作之一.为了防止粉体中 Al_2O_3 粒子原始聚集形态对实验结果的影响,需要对 Al_2O_3 粉体充分干燥、均匀分散.具体采用以下方法:

(1)将 4 g Al_2O_3 粉体在烘箱中充分干燥,然后将其放入喷管中(直径为 10 mm,长度为 10 cm).这个过程是为了消除作用在粒子之间的液体架桥力.

(2)在喷管的顶部加一片滤膜,滤膜的平均孔径为 $1\text{ }\mu\text{m}$.只有粒径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子可以通过滤膜,并跟随载气进入静电沉积室.

(3)载气为氮气,压力维持在 0.1 MPa.利用减压阀控制气体,使气体以脉冲形式进入喷管.脉冲气体促使粉体与喷管顶部的滤膜撞击,达到充分分散粉体的目的.

(4)为了消除粉体粒子自身所带电荷之间的相互作用,通过滤膜的粉体首先经过除电器的两片电极,然后进入静电沉积室.除电器的两片电极由两片不锈钢筛网构成,电极上施加 9 kV 的交流高压.

充分分散后的粉体进入静电沉积室,此时在金属针电极(曲率半径 1 mm)施加正极性高压直流电,持续 1 min.

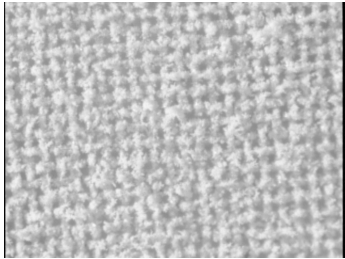
粒子附着形貌观测使用 MOTIC 实物显微镜和 ESEM-2700 电子扫描显微镜.

2 实验结果及讨论

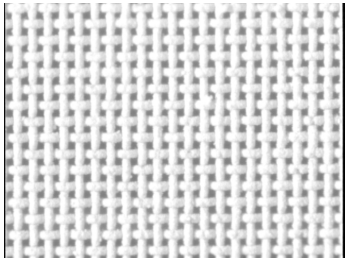
2.1 介电性粒子链的形成条件

为了方便观察,实验首先采用不锈钢筛网(孔径 100 目)作为附着的基材.实验过程中不锈钢筛网接地,其表面与金属针电极的距离为 2 cm.图 2 所示的是两组对比实验,其中(a)为高压电极施加 3 kV 电压时,不锈钢筛网上的附着形貌;(b)为高压电极施加 7 kV 电压时,不锈钢筛网上的附着

形貌. 在 3 kV 电压下, 电极之间不产生电晕放电, 即不发生空气击穿, Al_2O_3 粒子的沉积形态为团簇状, 并且多为粒子链状聚集形态. 而在 7 kV 电压下, 电极之间有电晕放电产生, 并有电流流过, Al_2O_3 粒子的沉积形态较为致密且均匀. 将图 2(a)的结果放在电子扫描显微镜下观察, 粒子链聚集体的微观形貌如图 3 所示.



(a) 无电晕放电



(b) 电晕放电

图 2 金属筛网上 Al_2O_3 粒子的附着形貌
Fig. 2 The adhesion state on the metal mesh surface of Al_2O_3

Al_2O_3 粒子是介电性粒子, 在有外电场存在时, 介电性粒子被外电场极化, 粒子表面出现极化电荷. 被极化粒子之间的相互静电作用力可以用以下方程式表示:

$$F = (P \cdot \nabla) E_e \tag{1}$$

其中 P 为介电性材料的极化率, E_e 为外加电场强度. 在纯静电场条件下, 即没有自由电荷存在, 介电性粒子表面仅出现束缚电荷. 在这种情况下, 可以认为极化后的介电性粒子是一个偶极子. 偶极子之间的相互作用可以用图 4 简单表示.

在静电场中, 介电性粒子被极化, 每个粒子被看做偶极子. 在式(1)所示的静电作用力下, 粒子之间相互吸引, 并沿外电场方向排列, 形成粒子链, 如图 4 所示. 从式(1)中可以看出介电性粒子

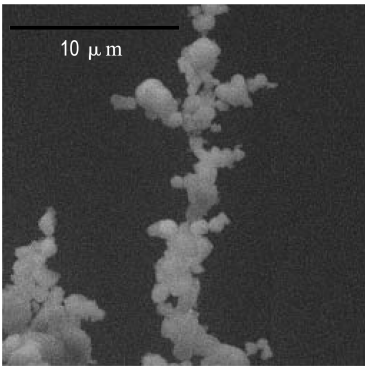
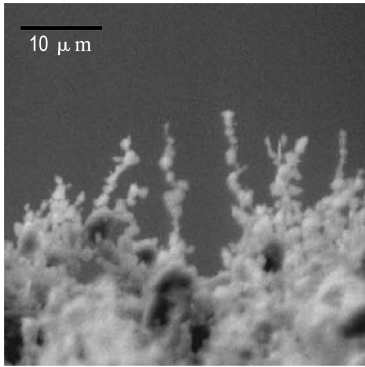


图 3 粒子链聚集体的微观形貌

Fig. 3 The microstructure of a particle-chain aggregate

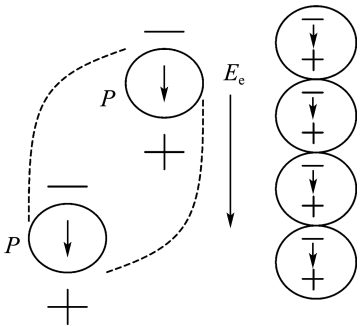


图 4 偶极子之间相互作用示意图

Fig. 4 The interaction force of dipoles

链形成的两个必要条件:

- (1)有偶极子存在.
- (2)有非均匀的梯度场存在. 这里的梯度场包含两部分, 一部分是外加电场, 一部分是由偶极子自身产生的电场.

当外加的非均匀电场中有电晕放电发生时, 介电性粒子的沉积过程与电除尘器中的过程相同, 粒子首先与气相中存在的自由电荷结合, 然后被电场驱动附着在基材表面. 由于同性电荷相斥, 自由电荷会干扰粒子链的形成. 本文实验的电极

之间的伏安特性如图 5 所示。在外加电压低于 3 kV 时,电极间没有电流产生,即没有发生电晕放电,因此实验中用于产生外加电场的电压选择 3 kV。

2.2 Al₂O₃ 基材表面三维网状沉积结构

使用图 1 所示的实验装置,进行了在 Al₂O₃ 基材表面实现粒子链沉积的实验。Al₂O₃ 基材的尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm。基材固定在金属板接地电极上,金属针电极与基材表面之间的距离为 2 cm,高压电极上施加 3 kV 正极性高压直流电。

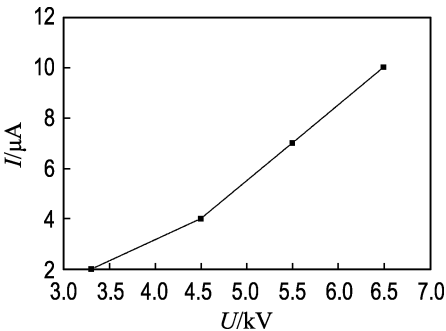
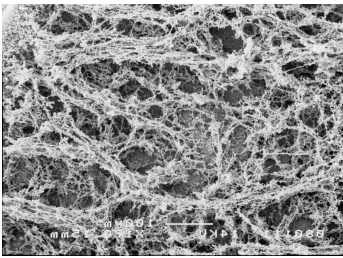


图 5 电极之间的伏安特性

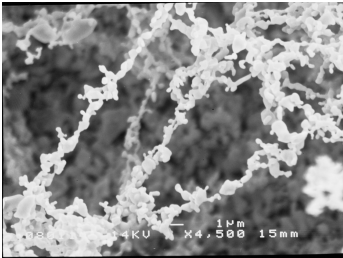
Fig. 5 The relation of voltage and current of electrode

Al₂O₃ 微细粉体粒子被分散到加有静电场的气相空间内,粒子浓度达到约 100 mg/m³。微细粒子在静电场作用下形成了粒子链聚集体,沉积在 Al₂O₃ 基材表面,形成了三维网络结构的附着层,如图 6(a)所示。为了增加附着层的力学强度,便于观察,将附着层与基材放入高温炉内进行了烧结,烧结温度 1 400 ℃,烧结时间 2 h。图 6(a)所示的结果为烧结后的显微照片。

Al₂O₃ 粒子链经高温烧结后形成了微细纤维,并且形成了纤维束,由图 6(a)可以看出多孔陶瓷膜是由纤维束构成的。图 6(b)为纤维束微细结构的电子显微镜照片。在电流变液体中,粒子链形成后也有集结成束的现象,由于电流变液体受到人们的广泛重视,其形成机理已被解开。但是在气相中,有关纤维束具体形成原因还未见相关报道,目前仅可解释为是静电场与载气流场共同作用的结果,具体详细的解释还有待后续研究。



(a) 静电形成法制备的 Al₂O₃ 纤维网状结构



(b) Al₂O₃ 纤维束微细结构

图 6 Al₂O₃ 纤维 SEM 照片

Fig. 6 SEM photos of Al₂O₃ fiber

3 结 论

(1)在静电场作用下,粒子链聚集体是可以控制形成的。本文实验中,在金属和介电基材表面分别得到了由粒子链构成的附着层。介电性粒子链形成的两个必要条件:①有偶极子存在;②有非均匀的梯度场存在。

(2)分散在气相中具有一定浓度的介电性微细粉体粒子在静电梯度场作用下聚集成链状聚集体,再经高温烧结变成微细陶瓷纤维,在 Al₂O₃ 基材表面形成了三维纤维网状结构的多孔陶瓷。

纤维网状结构多孔陶瓷材料通常是指采用陶瓷纤维作为主要原料制备的一种高孔隙陶瓷材料,目前被广泛用作高温隔热材料及高温过滤材料。本文研究的方法可以称之为静电形成法,主要特点是:直接从粉体材料制备纤维结构多孔陶瓷材料,工艺过程简单。经过进一步的深入研究,在制备纤维型陶瓷材料或微细纤维上会发挥其应有的作用。

参考文献:

[1] 朱克勤,陶容甲. 电流变液和电流变效应[J]. 力学进

展, 1994, **24**(2):154-162

[2] ZEBEL G. Über die aggregatbildung zwischen kugelförmigen aerosolteilchen mit parallel ausgerichteten dipolmomenten [J]. **Staub**, 1963, **23**(5):263-298

[3] FLOSSMANN R, SCHÜTZ A. Untersuchungen zur entstaubung von braunem konverterrauch nach einem neuartigen elektrostatischen verfahren [J]. **Staub**, 1963, **23**(5):443-451

[4] KASPER G, SHON S N, SHAW D T. Controlled formation of chain aggregates from very small metal oxide particles [J]. **American Industrial Hygiene Association Journal**, 1980, **41**(4):288-296

[5] YAMAMOTO H, MASUDA S. Fabrication of ultrafine ceramic filter [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1991, **27**(3):307-310

[6] YAMAMOTO H, MASUDA S. Electrostatic formation of ceramic membranes using CVD ultra-fine particles [J]. **Journal of Electrostatics**, 1990, **25**(1):125-133

[7] SU B, CHOY K L. Electrostatic assisted aerosol-gel deposition of porous silica films [J]. **Journal of Materials Science Letters**, 1999, **18**(20):1705-1707

[8] DASCALESCU L, TOBAZÉON R. Electrode protrusions and particle chaining as factors affecting the dielectric strength of air [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2000, **36**(2):526-530

[9] LEUNG Siu-ling, LI Ming-lin, LI Wen-J. Formation of gold nano-particle chains by DEP-a parametric experimental analysis [C] // **Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**. Sanya: IEEE, 2008

Effect of electrostatic field on deposition of dielectric particles

LI Guo-feng* , WANG Zhi-qiang

(Institute of Electrostatics and Special Power, Dalian University of Technology, Dalian 116024,China)

Abstract: The aggregation morphology of suspension dielectric particle in non-uniform electric field was investigated based on gas-solid two-phase system. Meanwhile, the deposition of particle chains in electrostatic field was analyzed and discussed. Experiments were carried out to research into the formation condition of dielectric particle chains. Experimental results demonstrate that the existence of dipole and non-uniform gradient field is the necessary formation condition of dielectric particle chains. Moreover, porous ceramic membrane is prepared by sintering Al_2O_3 fine powders which aggregate into chain structures. Due to non-uniform electric field, the dispersed adjacent particles in gas phase aggregate to particle chains, and deposit on the substrate surface and form three-dimensional network structure of porous adhesion layer. After sintering, particle chains become tiny ceramic fibers which constitute porous ceramic membranes on the substrate surface and enhance mechanics strength.

Key words: electrostatic field; particle chain; ceramic fiber