

气体静压轴承用多孔 SiC 陶瓷的制备及静态性能

于雪梅

(淮海工学院机械工程学院, 222005, 江苏连云港)

摘要: 以 α -SiC 和 β -SiC 粉末为原料, 羧甲基纤维素为造孔剂, 制备了多孔 SiC 陶瓷. 探讨了烧结温度、成型压力和造孔剂含量对 SiC 陶瓷的气孔率、显气孔率以及弯曲强度的影响, 研究了用不同渗透率的多孔 SiC 陶瓷制备气体静压轴承的承载能力和静态刚度. 结果表明: 在高温下, β -SiC 转变为 α -SiC, 同时, 通过 α -SiC 的蒸发-凝聚过程实现了 SiC 陶瓷的烧结, 并形成无收缩自结合结构; 试样的气孔率和显气孔率随烧结温度和成型压力的增加而略有降低, 但弯曲强度却增大; 造孔剂含量越高, 试样的气孔率和显气孔率越大, 弯曲强度越低. 添加质量分数为 10% 的造孔剂, 经 250 MPa 冷等静压成型, 在 2 400 °C 下制备的试样气孔率和显气孔率分别为 28.91% 和 24.03%, 渗透率为 $7.74 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, 弯曲强度为 63.8 MPa. 因此, 多孔 SiC 陶瓷的渗透率越低, 利用它制备的气体静压轴承的承载能力越低, 静态刚度就越高.

关键词: 多孔 SiC 陶瓷; 气体静压轴承; 气孔率; 静态性能

中图分类号: TH133.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0117-04

Preparation and Static Properties of Porous SiC Ceramic as Aerostatic Bearing

YU Xuemei

(School of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)

Abstract: Porous SiC ceramics were prepared with α -SiC and β -SiC powders, and carboxymethyl cellulose(CMC) as the pore entraining agent. The porosity, open porosity, and the flexural strength as functions of sintering temperatures, shaping pressures, and pore entraining agent content were investigated. The load capacity and the static stiffness of aerostatic bearing assembled by porous SiC ceramics with different permeability were studied. The results show that porous SiC ceramic is able to be prepared when the β -SiC converts to α -SiC by the aggregates connection in high temperature range. The porosity and the open porosity decrease and the flexural strength increases with increasing sintering temperatures and shaping pressures. The porosity and the open porosity increases and the flexural strength decreases with increase of pore entraining agent content. For the sample with 10% (mass fraction) CMC prepared at 250 MPa and 2 400 °C, the porosity and open porosity get respectively 28.91% and 24.03%, the permeability reaches to $7.74 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, flexural strength is 63.8 MPa. The lower the permeability of the porous SiC ceramic, the lower load capacity and the higher static stiffness of aerostatic bearing.

Keywords: porous SiC ceramic; aerostatic bearing; porosity; static property

气体静压轴承具有摩擦磨损极小、摩擦热少、运动精度高等优点, 因而在精密超精密工程、空间技术、电子精密仪器等领域中, 得到了广泛应用^[1-3]. 目

前, 小孔节流技术在理论和试验上都比较成熟, 但因承载能力低的缺点则限制了被广泛应用. 多孔质节流可以明显提高气体静压轴承的承载能力^[4-5], 并且

比传统的小孔节流器具有更优越的阻尼特性和稳定性等优点. 多孔质节流技术的关键问题就是对多孔质材料的选择, 主要有青铜、不锈钢、陶瓷和石墨等^[6], 其中陶瓷材料由于具有较强的耐气体冲刷能力, 以及良好的使用稳定性等优点而倍受关注.

由于多孔 SiC 陶瓷具有强度高、耐磨、耐腐蚀、抗氧化及稳定性好等特性, 因此已成为较理想的气体静压轴承用多孔质材料之一. 按多孔 SiC 陶瓷内部 SiC 颗粒的结合方式, 其制备方法可分为第 2 相结合法和直接结合法^[7], 前者通过外加或反应生成的第 2 相(即玻璃相)结合 SiC 颗粒而实现了材料烧结^[8-9]; 后者则是以 SiC 颗粒间的直接结合来实现材料烧结. 多孔 SiC 陶瓷内玻璃相的存在对其内部的孔隙状态有直接影响, 当烧结温度较低时, 陶瓷体内不存在晶界玻璃相的黏性流动, 烧结程度较低, 试样表现出较高的气孔率和显气孔率. 当烧结温度较高时, 陶瓷体内出现晶界玻璃相的黏性流动, 填充了部分气孔通道, 使开口气孔转变为闭气孔和盲孔, 而闭气孔在烧结过程中消除困难, 因此试样表现出气孔率变化不大, 但开口气孔率却下降明显. 对于理想的气体静压轴承采用的多孔质材料, 其内部应该仅仅存在着尺寸一致且分布均匀的联通孔隙, 没有闭气孔和盲孔. 因此, 气体静压轴承用多孔 SiC 陶瓷的制备方法应为直接结合法.

本文采用粉末冶金法制备了多孔 SiC 陶瓷, 研究了制备工艺参数对多孔 SiC 陶瓷微观组织和力学性能的影响规律, 分析了具有不同渗透率多孔 SiC 陶瓷制备的气体静压轴承的承载能力和静态刚度, 给出了多孔 SiC 陶瓷的合理制备工艺参数. 这对于陶瓷多孔质气体静压轴承的进一步研究具有一定的现实意义.

1 实验

实验选用 α -SiC 粉末, 其质量分数(纯度)大于 99%, 平均粒径约为 20 μm . 选用的 β -SiC 粉末, 其纯度大于 99%, 平均粒径为 8 μm . 使用的市售羧甲基纤维素(CMC)呈白色团絮状. 按质量比为 9 : 1 的比例分别称量 α -SiC 和 β -SiC 粉末, 将其与不同比例的造孔剂 CMC 在行星式球磨机上进行充分混合, 利用真空干燥箱将粉末烘干. 然后, 将混合均匀的粉末以 200~300 MPa 冷等静压成型. 利用高温中频真空感应烧结炉, 先将素坯进行预烧结处理(300 $^{\circ}\text{C}$, 2 h), 目的是使加入的 CMC 得到热分解. 随后抽真空至 10^{-2} Pa, 充氩气, 升温到 2 350~2

450 $^{\circ}\text{C}$ 进行烧结, 烧结 2 h 后随炉冷却.

采用阿基米德原理测定试样的体积密度和显气孔率, 利用 X 射线衍射仪(D/max-rB)分析试样的相组成. 利用扫描电子显微镜(Hitachi S-4700)观察孔隙结构, 在 Instron-5569 型电子万能材料实验机上通过三点弯曲法测定材料的弯曲强度. 利用自制实验设备测量材料的气体渗透率, 以及装配后的气体静压轴承的承载能力和静态刚度.

2 结果与讨论

2.1 物相分析及孔隙观察

实验利用 β -SiC 在高温条件下转变为 α -SiC 来黏结原始 α -SiC 颗粒, 并利用 SiC 的高温蒸发-凝聚机理, 来实现多孔 SiC 陶瓷的烧结. 图 1 给出了原始 β -SiC 粉末与采用不同烧结温度制备试样的 X 射线衍射图谱(XRD), 成型压力为 250 MPa, $w(\text{CMC})=5\%$. 通过对比图 1a 和图 1b 可见, 当烧结温度为 2 350 $^{\circ}\text{C}$ 时, 试样的组成主要为 α -SiC 相, 同时存在着少量的 β -SiC 相, 这说明所添加的 β -SiC 并没有完全转化为 α -SiC. 当温度分别为 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 和 2 450 $^{\circ}\text{C}$ 时, 试样由单一的 α -SiC 组成, 没有观察到 β -SiC 的衍射峰, 这说明最初添加的 β -SiC 已完全转化为 α -SiC.

图 2 为在 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 下制备试样的扫描电镜(SEM)照片, 照片中黑色的区域为孔洞, 其余为 SiC 基体. 由照片可以看出, 试样中的孔隙主要以两种方

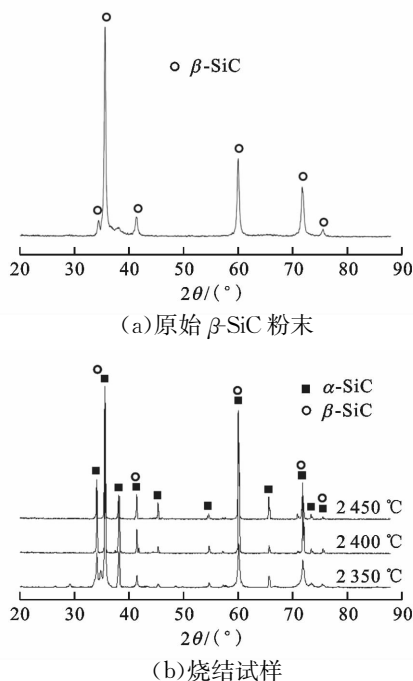


图1 制备试样的XRD图谱

式存在:一种是尺寸相对较大的孔洞,它主要是由造孔剂 CMC 形成;另一种是尺寸相对较小的孔洞,这些孔洞主要是由原始 SiC 颗粒堆积而形成. 另外还可看出,CMC 形成的孔隙尺寸相差较小,在试样中分布的比较均匀,并且它们之间相互联接形成联通的孔道网络,孔道平均直径约为 40 μm . 这种结构主要是由于 CMC 热分解并以气体形式向试样表面逸出而形成的.

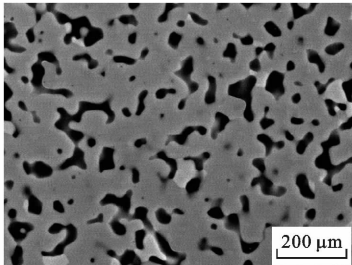


图 2 试样的 SEM 照片

2.2 烧结温度的影响

表 1 给出了烧结温度 T 对多孔 SiC 陶瓷性能的影响规律,成型压力为 250 MPa, $w(\text{CMC})=5\%$. 由表 1 可以看出,随着烧结温度的升高,试样的气孔率 ρ 和显气孔率 ρ_a 均降低,但当温度由 2 350 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 时,两者的下降幅度比较大,而当温度由 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 2 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,两者的下降幅度较小. 这主要是由于温度为 2 350 $^{\circ}\text{C}$ 时,试样的烧结并不完全(见图 1),因此其气孔率和显气孔率相对较大. 随着烧结温度增加到 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 时,试样的烧结程度得到提高,则气孔率和显气孔率明显降低. 烧结温度从 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 2 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,材料的显气孔率变化并不明显,但其弯曲强度 σ 则提高了 13%,这表明在 2 400 $^{\circ}\text{C}\sim 2\ 450\ ^{\circ}\text{C}$ 时, SiC 陶瓷的烧结机理主要为蒸发-凝聚过程. SiC 颗粒形成重结晶 SiC 陶瓷,在结构上形成了无收缩自结合结构^[10]. 另外,由表 1 还可看出,随着烧结温度的升高,试样的弯曲强度呈现增大趋势. 研究表明,多孔陶瓷的强度与其内部气孔率^[11]之间符合

$$\sigma = \sigma_0 e^{-bp}$$

式中: σ_0 表示气孔率为 0 时的试样强度; b 为常数.

表 1 烧结温度对多孔 SiC 陶瓷性能的影响

$T/^{\circ}\text{C}$	$\rho/\%$	$\rho_a/\%$	σ/MPa
2 350	27.13	25.07	48.5
2 400	22.12	17.74	89.6
2 450	20.58	16.09	101.4

由上式可知,多孔陶瓷的强度随着其内部气孔率的降低而成指数规律增加. 对于 2 350 $^{\circ}\text{C}$ 烧结的试

样,其强度较低的原因主要是由于烧结不完全所致.

2.3 成型压力的影响

表 2 给出了当 $T=2\ 400\ ^{\circ}\text{C}$ 、 $w(\text{CMC})=5\%$ 时,在不同成型压力 P 下,多孔 SiC 陶瓷的气孔率、显气孔率和弯曲强度. 从表中可以看出,随着成型压力的增加,素坯的密度增加,从而导致最终烧结制备的多孔 SiC 陶瓷的气孔率和显气孔率均有所下降,而其弯曲强度则逐渐增大. 与烧结温度相比,成型压力对多孔 SiC 陶瓷性能的影响程度相对要小一些.

表 2 成型压力对多孔 SiC 陶瓷性能的影响

P/MPa	$\rho/\%$	$\rho_a/\%$	σ/MPa
200	23.34	18.23	84.3
250	22.12	17.74	89.6
300	21.08	16.58	95.2

2.4 造孔剂含量的影响

表 3 给出了 CMC 含量对多孔 SiC 陶瓷性能的影响,其中 $P=250\ \text{MPa}$, $T=2\ 400\ ^{\circ}\text{C}$. 由表 3 可以看出,多孔 SiC 陶瓷的气孔率和显气孔率与造孔剂的含量有关,因为烧结后试样中的孔洞主要来源于造孔剂烧除后留下的空隙,因此造孔剂的含量越高,烧结后陶瓷材料的气孔率和显气孔率就越大. 与之相应,陶瓷材料的弯曲强度则随着造孔剂含量的增加而降低.

表 3 造孔剂含量对多孔 SiC 陶瓷性能的影响

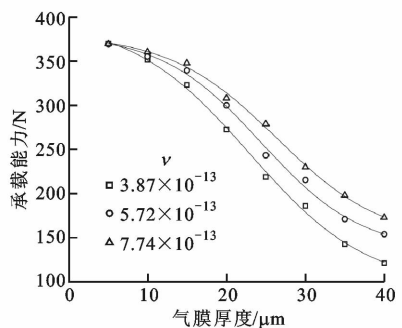
$w(\text{CMC})/\%$	$\rho/\%$	$\rho_a/\%$	σ/MPa
0	16.33	12.01	124.3
5	22.12	17.74	89.6
10	28.91	24.03	63.8

2.5 气体静压轴承的静态性能

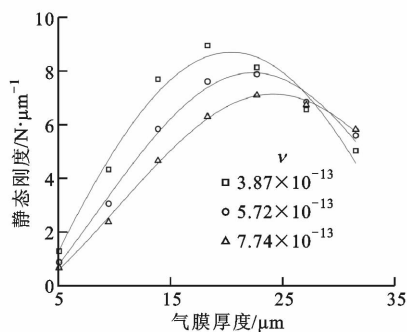
气体静压轴承用多孔质材料的渗透率 v 会直接影响到气体静压轴承的性能. 研究表明,当孔隙结构一定时,多孔质材料的 v 随其显气孔率的增加而增大^[12],但对其精确定量的求解比较困难. 本文通过实验方法测量了多孔 SiC 陶瓷的渗透率,对于 $w(\text{CMC})=0$, $w(\text{CMC})=5\%$ 和 $w(\text{CMC})=10\%$ 的试样,在 2 400 $^{\circ}\text{C}$ 、250 MPa 的条件下,其渗透率分别为 3.87×10^{-13} 、 5.72×10^{-13} 、 $7.74\times 10^{-13}\ \text{m}^2$. 采用上述 3 种不同渗透率的多孔 SiC 陶瓷分别制备了气体静压轴承,并测试了轴承的静态性能.

图 3 给出采用不同渗透率的多孔 SiC 陶瓷制备的气体静压轴承的静态性能. 由图 3a 可见,气体静压轴承的承载能力均随着气膜厚度的增大而降低, SiC 陶瓷的 v 越小,所制轴承的承载能力越低且下降速率越快. 由图 3b 可知,气体静压轴承的静态刚

度均随着气膜厚度的增大而先升高后降低, SiC 陶瓷的渗透率越小, 所制备的轴承静态刚度就越高。



(a) 承载能力



(b) 静态刚度

图3 气体静压轴承的静态曲线

3 结 论

(1) 利用 SiC 的高温蒸发-凝聚烧结机理能够获得不含玻璃相的多孔 SiC 陶瓷, 有效烧结温度为 2 400 °C。随着烧结温度和成型压力的增加, 试样的气孔率和显气孔率均略有下降, 而弯曲强度却增大。造孔剂含量对材料的组织和性能均有明显影响, 随其含量的增加, 试样的气孔率、显气孔率和渗透率均增大, 但弯曲强度则降低。

(2) 在供气压力相同、气膜厚度一定的条件下, 多孔 SiC 陶瓷的渗透率越小, 所制备的气体静压轴承的承载能力就越低, 但静态刚度则越高。

参考文献:

- [1] POWELL J W. Design of aerostatic bearing [M]. Brighton, UK: Machinery Publishing, 1970:12-18.
- [2] PANZERA T H, RUBIO J C, BOWEN C R, et al. Microstructural design of materials for aerostatic bearings [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30 (7):649-660.
- [3] UHLMANN E, NEUMANN C. Air bearings based on porous ceramic composites [C]// Intelligent Production Machines and Systems; 2nd I * PROMS Virtual International Conference. Cardiff, UK: Elsevier,

2006:211-216.

- [4] 陈汝刚, 侯予, 袁秀玲, 等. 低温透平制冷机的静压气体润滑轴承研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7):792-796.
- CHEN Rugang, HOU Yu, YUAN Xiuling, et al. Study of gas lubrication externally-pressurized air bearing for cryogenic turbo-refrigerator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7):792-796.
- [5] 杜金名, 卢泽生, 孙雅洲. 气体静压小孔节流与多孔质节流性能的比较 [J]. 润滑与密封, 2002, 27(4): 2-3.
- DU Jinming, LU Zesheng, SUN Yazhou. Performance comparison of orifice restricted and porous gas hydrostatic bearings [J]. Lubrication Engineering, 2002, 27(4):2-3.
- [6] 王云飞. 气体润滑理论与气体轴承设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 395-398.
- [7] 丁书强, 曾宇平, 江东亮. 原位反应结合碳化硅多孔陶瓷的制备与性能 [J]. 无机材料学报, 2006, 21 (6):1397-1403.
- DING Shuqiang, ZENG Yuping, JIANG Dongliang. Preparation and properties of in situ reaction bonded porous SiC ceramics [J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(6):1397-1403.
- [8] FUKUSHIMA M, ZHOU Y, YOSHIKAWA Y. Fabrication and microstructural characterization of porous SiC membrane supports with Al_2O_3 - Y_2O_3 additives [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 339(1/2): 78-84.
- [9] MAGNANI G, ANTOLINI F, BEAULARDI L, et al. Sintering, high temperature strength and oxidation resistance of liquid-phase-pressureless-sintered SiC-AlN ceramics with addition of rare-earth oxides [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29 (11):2411-2417.
- [10] 易中周, 谢志鹏, 黄勇, 等. 重结晶碳化硅凝胶注模成型及其性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2002, 21(4): 3-7, 15.
- YI Zhongzhou, XIE Zhipeng, HUANG Yong, et al. Study on gelcasting and property of recrystallized silicon carbide [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2002, 21(4):3-7, 15.
- [11] RYSHKEWITCH E. Compression strength of porous sintered alumina and zirconia [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1953, 36(2):65-68.
- [12] CARMAN P C. Fluid flow through granular beds [J]. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, 1937, 15:150-156.

(编辑 管咏梅 赵大良)