

[文章编号] 1004- 0609(2002)S1- 0041- 03

氮化硅陶瓷磨削表面残余应力的测试与计算^①

祝昌军¹, 高 玲¹, 杨海涛¹, 金景烈², 蒋 俊¹

(1. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070; 2. 浦项工业大学 浦项加速器实验室, 韩国)

[摘 要] 利用 X 射线衍射应力分析的 $\sin^2 \psi$ 法测量、计算出氮化硅陶瓷试样的残余应力。分析表明, 经平面磨磨削后的气压烧结合氮化硅陶瓷试样表面存在的残余应力为拉应力, 而再经过表面抛光处理, 则可以适当地降低表面残余应力。

[关键词] 残余应力; 气压烧结合; 氮化硅

[中图分类号] TG 84

[文献标识码] A

氮化硅陶瓷作为一种重要的结构陶瓷在轴承、阀芯、挺杆、转子等零件中得到了广泛的应用, 但作为特殊的工程材料, 氮化硅陶瓷零件的断裂强度和韧性对表面应力状态异常敏感, 残余压应力将会提高其断裂强度, 残余拉应力的作用则正好相反^[1]。在一般情况下, 这些陶瓷零件都是经过磨削、表面抛光等处理的, 而磨削、表面抛光等处理过程必定会影响氮化硅陶瓷零件的表面应力状态。作者用 X 射线衍射分析方法对氮化硅陶瓷表面的残余应力进行了分析, 比较了磨削和表面抛光处理对其表面应力状态的影响。

1 测试原理

对于理想的多晶体, 在无应力的状态下, 不同方位的同族晶面面间距是相等的, 而当受到一定的宏观残余应力 σ 时, 不同晶粒的同族晶面面间距随晶面方位及应力的变化发生有规律的变化, 从而使 X 射线衍射谱线发生位偏移。根据位偏移的大小则可以计算出残余应力的变化^[2]。式(1)是 X 射线衍射分析计算残余应力的基本公式^[3]:

$$\sigma = - \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180^\circ} \cot \theta_0 \frac{\partial^2 \theta_\phi}{\partial \sin^2 \phi} \quad (1)$$

令

$$K = - \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180^\circ} \cot \theta_0 \quad (2a)$$

$$M = \frac{\partial^2 \theta_\phi}{\partial \sin^2 \phi} \quad (2b)$$

则

$$\sigma = K \cdot M \quad (2c)$$

式中 E 为弹性模量, ν 为泊松比, θ_0 为所选晶面在无应力情况下的衍射角, ϕ 为试样表面法线与所选晶面法线的夹角(见图 1), θ_ϕ 为所选晶面实际测量的衍射角。

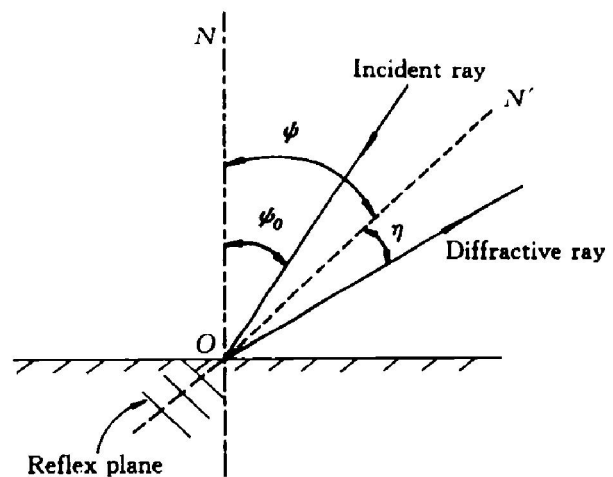


图 1 入射线、衍射线、表面法线和晶面法线间的角度关系

Fig. 1 Relation between incident ray, diffractive ray and normals of surface and crystal face

2 实验和数据处理

2.1 实验

本实验是在韩国浦项工业大学浦项加速器实验室采用日本 MAC Science Co. Ltd 公司制造的型号为 MXP18, 18K 的 X 射线衍射仪, 对以 TiN, AlN, Al_2O_3 , Y_2O_3 为烧结助剂经气压烧结合的氮化硅陶瓷进行 X 射线衍射分析。在分析前, 氮化硅陶瓷用平面磨分别磨削(试样 1)和磨削后表面抛光处理(试

① [收稿日期] 2001- 10- 15; [修订日期] 2001- 11- 02

[作者简介] 祝昌军(1978-), 男, 硕士研究生。

样 2), 再用 $\sin^2 \psi$ 方法对两种试样进行测试, 所选 ϕ_0 (为入射线与试样表面法线的夹角, 见图 1) 分别为 0° , 15° , 30° , 45° , 测试条件如表 1 所示, 测试结果见表 2。

表 1 测试条件

Table 1 Test condition

Target	Sampling width /($^\circ$)	Scanning speed /[$(^\circ) \cdot \text{min}^{-1}$]	Divergence slit /($^\circ$)
1. 540 56 ÅCu	0.0100	0.4000	0.50
Target	Scattering slit /($^\circ$)	Receiving slit /mm	Diffraction plane
1. 540 56 ÅCu	0.50	0.15	(303)

表 2 测试结果

Table 2 Test result

$\phi_0 / (^\circ)$	$2\theta / (^\circ)$	
	Specimen 1	Specimen 2
0	120.02	119.95
15	120.01	119.90
30	119.96	119.87
45	119.89	119.83

2.2 数据处理

由方程式(2b)得 $2\theta_\psi$ 与 $\sin^2 \psi$ 成线性关系, M 为该直线的斜率, 其直线方程可以写为 $2\theta_{\psi_i} = 2\theta_{\psi=0} + M \sin^2 \psi_i$ 。设 ψ_i 方位时, 衍射角的实测值为 $2\theta_i$, 它与直线上的理想值之差为 V_i , 即 $V_i = 2\theta_i - 2\theta_{\psi=0} - M \sin^2 \psi_i$ 。由最小二乘方的原则, 最佳直线方程中的常数项 $2\theta_{\psi=0}$ 及 M 应满足 $\sum_{i=1}^n V_i^2$ 最小值, 则

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^n V_i^2}{\partial 2\theta_{\psi=0}} = -2 \sum_{i=1}^n (2\theta_i - 2\theta_{\psi=0} - M \sin^2 \psi_i) = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n V_i^2}{\partial M} = -2 \sum_{i=1}^n (2\theta_i - 2\theta_{\psi=0} - M \sin^2 \psi_i) \sin^2 \psi_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

解上述方程可得

$$M = \frac{n \sum (2\theta_i \sin^2 \psi_i) - \sum \sin^2 \psi_i \sum 2\theta_i}{n \sum \sin^2 \psi_i - (\sum \sin^2 \psi_i)^2} \quad (4)$$

由图 1 可见 $\psi = \phi_0 + \eta$, 而 $2\eta = 180 - 2\theta$, 则方程式(4)中 $\psi_i = \phi_0 + 90 - \theta_i$, $n = 4$, 再将表 2 结果代入, 得 $M_1 = -0.1867$, $M_2 = -0.1689$ 。所选

晶面为氮化硅的(303)晶面, 而 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 为六方晶系, 其晶胞常数为 $a_0 = 7.6044 \text{ Å}$, $c_0 = 2.9075 \text{ Å}$ 由

$$d = \frac{1}{\sqrt{\frac{4(h^2 + hk + k^2)}{3a_0^2} + \frac{l^2}{c_0^2}}} \quad (5)$$

可得其面间距 $d = 0.8866 \text{ Å}$ 。由布拉格方程 $2d \sin \theta = n\lambda$ 得 $\theta_0 = 60.32^\circ$ 。取氮化硅陶瓷的弹性模量 $E = 297 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.25^{[4,5]}$, 代入式(2a)中得 $K = -1181.75 \text{ MPa}$, 则残余应力 $\sigma_1 = KM_1 = 220.60 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = KM_2 = 199.60 \text{ MPa}$ 。

可见在此实验条件下, 经平面磨磨削后的氮化硅陶瓷试样表面的残余应力为正值, 即氮化硅试样表面存在拉应力, 再经过表面抛光处理后, 可以减小残余拉应力的大小, 但由于 σ_2 与 σ_1 相差不大, 故其效果不是很明显。另外, 由于氮化硅试样表面的残余应力总是为拉应力, 从而使氮化硅陶瓷的断裂强度下降。

3 结论

1) 经平面磨磨削后的氮化硅陶瓷试样表面的残余应力为拉应力, 使氮化硅陶瓷的断裂强度下降。

2) 表面抛光处理可以降低表面残余应力的大小, 但在本实验中, 效果不是很明显。

[REFERENCES]

- [1] 王西彬, 李相真. 结构陶瓷磨削表面的残余应力[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1997, 6: 8-21.
WANG Xi-bing, LI Xiang-zhen. Residual stress of ground surface of structure ceramics [J]. Diamond and Grind Tools Engineering, 1997, 6: 18-21.
- [2] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999. 65.
ZHANG Ding-quan, HE Jia-wen. Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction and its Functions [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999. 65.
- [3] 周玉. 材料分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 61-73.
ZHOU Yu. Analysis Methods of Materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 63-71.
- [4] Kurita M, Kano T, Sato T. Residual stress analysis of silicon nitride to carbon steel joint [J]. Advances in X-ray Analysis, 1991, 34, 661-668.

- [5] Zenjiro Y, Yukio H, Yoichi K, et al. X-ray residual stress measurement of ground surface of meta ceramic composite [J]. Advances in X-ray Analysis, 1991, 34, 679– 687.

Testing and computing of residual stress of ground surface of silicon nitride ceramic

ZHU Chang-jun¹, GAO Ling¹, YANG Hai- tao¹, KIM Kyung-ryul², JIANG Jun¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Technology,

Postech, Pohang 790784, Korea)

[Abstract] The principle of residual stress analysis by X-ray diffraction was introduced. And the residual stress of the surface of silicon nitride ceramic, which sintered by GPS and ground by plane grind, was tested and computed by the method of $\sin^2 \psi$ of X-ray diffraction analysis. The results indicate that there are tensile stresses in the surface of silicon nitride ceramic, and polishing can reduce the residual stress.

[Key wordS] residual stress; gas pressure sinter; silicon nitride

(编辑 吴家泉)