

多型体 SiAlON(12H, 21R)结合刚玉耐火材料的制备及力学性能

栗娅敏, 张厚兴, 钟香崇

(郑州大学, 高温功能材料河南省重点实验室, 郑州 450052)

摘 要: 以电熔白刚玉、矾土细粉、铝(Al)粉和硅(Si)粉为原料, 通过原位氮化反应烧结工艺在较低温度(1 500 °C)下制备了多型体 SiAlON[12H(SiAl₅O₂N₅), 21R(SiAl₆O₂N₆)]结合刚玉耐火材料。研究了多型体 SiAlON 含量对材料的体积密度、显气孔率、常温及高温抗折强度的影响。用 X 射线衍射和扫描电镜分析材料的物相组成及显微结构。结果表明: 随多型体 SiAlON 含量的增加, 材料的常温及高温抗折强度显著提高, 多型体 SiAlON 的质量分数为 15% 时, 1 400 °C 材料的抗折强度可达 29 MPa。显微结构的研究表明: 多型体 SiAlON(12H, 21R)结合刚玉耐火材料的高温断裂方式以穿晶断裂为主。

关键词: 多型体 SiAlON; 力学性能; 显微结构; 原位氮化反应

中图分类号: TQ175 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-5648(2007)09-1226-06

PREPARATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF SiAlON (12H, 21R) POLYTYPOIDS BONDED CORUNDUM REFRACTORY

Li Yamin, ZHANG Houxing, ZHONG Xiangchong

(High Temperature Ceramics Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Using fused white corundum, bauxite, elemental aluminum(Al) and silicon(Si) powders as raw materials, SiAlON [12H(SiAl₅O₂N₅), 21R(SiAl₆O₂N₆)] polytypoids bonded corundum refractory was prepared at 1 500 °C by the *in situ* nitridation reaction. Effects of SiAlON polytypoids contents on the bulk density, apparent porosity and room and high temperature modulus of rupture were investigated. The phase composition and microstructure of the refractory were analyzed by X-ray diffraction and scanning electron microscope, respectively. The results show that the room and high temperature modulus of rupture increased dramatically with the increase of SiAlON polytypoids contents. The hot modulus of rupture of the refractory at 1 400 °C was as high as 29 MPa when the SiAlON polytypoids mass fraction was 15%. The fracture behavior at elevated temperature was dominated by transcrystalline fracture for the SiAlON (12H, 21R) polytypoids bonded corundum refractory based on the microstructure study.

Key words: SiAlON polytypoids; mechanical properties; microstructures; *in situ* nitridation reaction

在硅-铝-氧-氮(Si-Al-O-N)系统中组分位于 β-SiAlON 与氮化铝(AlN)之间有 5 种类似 AlN 结构的多型体[15R, 12H(SiAl₅O₂N₅), 21R(SiAl₆O₂N₆), 27R 和 2H⁰], 称之为多型体 SiAlON, 其组分可用 M_mX_{m+1} 表示(其中: M=Al, Si; X=N, O; m=4, 5, 6, 7, 9, 11)^[1-3]。多型体 SiAlON 材料具有在高温下强度高且保持不降低的特点^[4], 主要是由于其结构中多型体 SiAlON 晶粒之间多为直接结合, 低熔

点玻璃相孤立地存在于三晶交界处^[5]。

多型体 SiAlON 晶体具有异向生长的特性, 随其组成向富 AlN 的方向变化, 其显微形貌从针状、柱状、板状逐渐过渡到粒状^[4]。这种异向生长特性为采用原位反应烧结工艺制备增韧增强的复合材料提供了条件^[6]。此外, 多型体 SiAlON 还具有热膨胀系数低[(5.1~5.9)×10⁻⁶/°C]^[5]、抗侵蚀性能及抗水化性能优良的特点^[7]。因此, 多型体 SiAlON 及其复合

收稿日期: 2007-03-22。 修改稿收到日期: 2007-05-21。

第一作者: 栗娅敏(1980~), 女, 硕士研究生。

通讯作者: 张厚兴(1973~), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2007-03-22. Approved date: 2007-05-21.

First author: Li Yamin (1980~), female, graduate student for master degree.

E-mail: lyyamin@126.com

Correspondent author: ZHANG Houxing (1973~), male, doctor, associate professor.

E-mail: zhhxjm@sina.com

材料可望成为新的高性能耐火材料。

目前,多型体 SiAlON 材料的研究主要局限于精细陶瓷领域,研究的重点为多型体材料本体的性能^[4,8]。多型体 SiAlON 材料多以 Al_2O_3 , Si_3N_4 , AlN 等低成本微粉为原料,在氮气气氛中经高温(1 600~1 800 °C)热压烧结而成^[9-11]。这种高成本的制备工艺为其在耐火材料领域中的应用带来很大困难,因此,在耐火材料领域,其复合材料的制备、组成、结构与性能的研究鲜有报道。

实验以电熔白刚玉、廉价矾土细粉、铝(Al)粉和硅(Si)粉为原料,采用原位氮化反应烧结制备多型体 SiAlON 结合刚玉耐火材料,并对其组成、结构与力学性能进行评价,以期多型体 SiAlON 在耐火材料领域的应用提供参考。

1 实 验

用粒度为 1~3 mm, 0.088~1 mm 及 ≤ 0.044 mm 的电熔白刚玉(99% Al_2O_3 , 质量分数,下同)、矾土细粉(88.74% Al_2O_3 , 4.56% SiO_2 , 3.31% TiO_2 , 2.24% Fe_2O_3 , 0.70% CaO , 0.39% MgO)、金属 Al 粉(99% Al)和 Si 粉(99% Si)。以 1~3 mm, 0.088~1 mm 的电熔白刚玉为骨料,以 ≤ 0.044 mm 的电熔白刚玉、矾土细粉、金属 Al 粉及 Si 粉为基质料。配料中 1~3 mm, 0.088~1 mm 的骨料的含量分别为 40% 和 20%, 基质料的含量为 40%。

配料中多型体 SiAlON 的理论含量[以 $\text{SiAl}_3\text{O}_2\text{N}_5$ (12H)计]分别为 0, 5%, 10%, 15%, 20%, 相应的样品编号为样品 A0、样品 A5、样品 A10、样品 A15、样品 A20。以亚硫酸纸浆废液为结合剂,混合均匀后以 150 MPa 压力机压成 25 mm×25 mm×125 mm 的长条样品和 $\Phi 36$ mm×36 mm 的圆柱样品,样品经干燥后在氮气中进行氮化反应烧结,烧结温度为 1 500 °C,保温时间为 5 h。

用 Archimedes 法测定烧结后样品的体积密度和显气孔率。用三点弯曲法测定烧结后长条样品的常温及高温抗折强度。用实验压力机测定烧结后圆柱样品的常温耐压强度。用 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析烧结后样品的物相组成。根据烧结样品完全氧化后的质量增加率估算其多型体 SiAlON 的含量。用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察烧结后样品高温断口的形貌,并用能谱仪(energy dispersive spectroscopy, EDS)进行微区元素分析。

2 结果与讨论

2.1 多型体 SiAlON 结合刚玉材料的物相组成

图 1 为氮化反应烧结后的样品 A5~样品 A20 及样品 A20 基质 A20M 的 XRD 谱。从图 1 可以看出:材料中的主晶相为刚玉,次晶相为 12H 与 21R 多型体 SiAlON。随配料中多型体 SiAlON 理论引入量的增加,烧结后样品中多型体 SiAlON 的含量逐渐增加。虽然配料设计中的多型体 SiAlON 为 12H,但烧结后样品中并没有得到单一的 12H,而是得到 12H 和 21R 两种多型体 SiAlON 相,这是由于在 Si-Al-O-N 系统中 12H 和 21R 的相区非常邻近^[2],故相邻的多型体很容易同时出现。

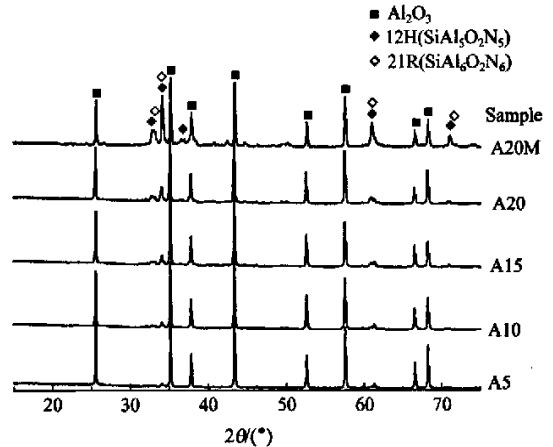


图 1 经 1 500 °C 反应烧结后样品的 XRD 谱

Fig.1 X-ray diffraction (XRD) patterns of samples sintered at 1 500 °C

因多型体 SiAlON 的氧化伴随着质量的增加,故可根据样品完全氧化后质量的变化来估算其多型体 SiAlON 的含量。12H 与 21R 的理论氧化质量增加率(完全氧化后质量的增加值与氧化前的质量之比)分别为 18.87% 和 19.61%, 二者的平均理论氧化质量增加率为 19.24%。实验测得样品 A5~样品 A20 完全氧化质量增加率分别为 0.62%, 1.67%, 2.95%, 4.05%, 据此可粗略估算出各样品中多型体 SiAlON 的含量分别为 4.22%, 9.58%, 15.33%, 21.05%, 这与配料中的理论引入量基本吻合。以上结果表明:采用原位氮化反应烧结工艺可在较低温度(1 500 °C)下制备出多型体 SiAlON (12H, 21R)结合刚玉耐火材料。

2.2 多型体 SiAlON 结合刚玉材料的体积密度和显气孔率

图 2 示出了多型体 SiAlON 含量对多型体 SiAlON 结合刚玉材料的显气孔率和体积密度的影响。从图 2 可以看出：多型体 SiAlON 结合刚玉材料的显气孔率明显高于单一的刚玉材料。随多型体 SiAlON 含量的增加，显气孔率的变化呈逐渐增大的趋势。这主要归因于多型体 SiAlON 相对较差的可烧结性及其晶粒的异向生长特性。多型体 SiAlON 的可烧结性同刚玉相比相对较差；异向生长的晶粒在结构内易产生“桥架作用”，故随多型体 SiAlON 含量的增加，材料的显气孔率逐渐增大。体积密度随多型体 SiAlON 含量的增大逐渐降低，一方面由于材料的显气孔率的逐渐增大；另一方面由于多型体 SiAlON 的体积密度(3.349~3.386 g/cm³)^[9]比刚玉(>3.90 g/cm³)^[12]的低。

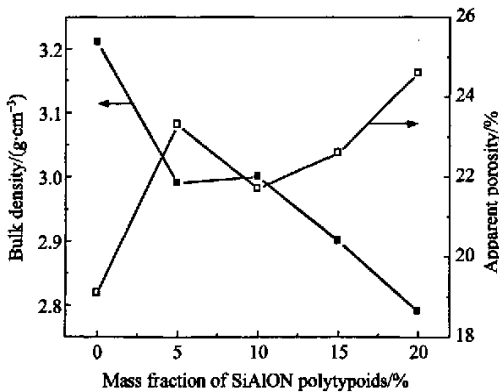


图 2 样品的体积密度和显气孔率与多型体 SiAlON 质量分数的关系

Fig.2 Relationship between bulk density, apparent porosity of samples and mass fraction of SiAlON polytypoids

2.3 多型体 SiAlON 结合刚玉材料的力学性能

图 3 为烧后样品的常温抗折强度与多型体 SiAlON 含量的关系。从图 3 可以看出：多型体 SiAlON 结合刚玉材料的抗折强度均显著高于不含多型体 SiAlON 的刚玉材料的。随着多型体 SiAlON 含量的增加，材料的常温抗折强度显著提高，多型体 SiAlON 含量为 15% 时，常温抗折强度高达 28.8 MPa。多型体 SiAlON 含量为 20% 时，材料的常温抗折强度有所降低。这也许是由于多型体 SiAlON 含量过高时，材料的显气孔率较高的缘故。多型体 SiAlON 结合刚玉材料的常温耐压强度的变化规律与常温抗折强度的基本一致。

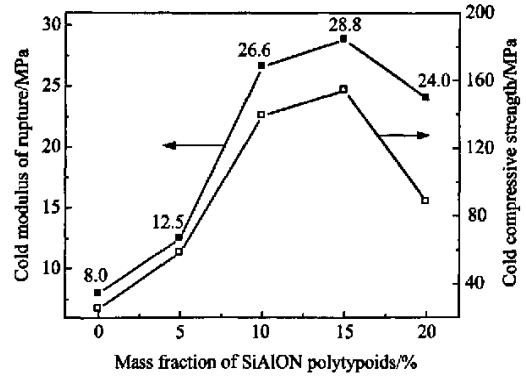


图 3 多型体 SiAlON 含量与样品的常温抗折强度和耐压强度
Fig.3 Cold modulus of rupture and compressive of strength vs SiAlON polytypoids mass contents

多型体 SiAlON 结合刚玉材料 1 400 °C 的抗折强度如图 4 中所示。由图 4 可以看出：随多型体 SiAlON 含量的增加，材料的高温抗折强度显著提高，当其含量在 15% 时，高温抗折强度可达 29 MPa。对比图 3 与图 4 中的抗折强度不难发现，当多型体 SiAlON 含量较低时，材料的高温抗折强度明显低于常温的，随其含量的提高，材料高温抗折强度与其常温的差值逐渐减小，当含量超过 15%，材料的高温抗折强度与常温的基本相当。上述材料的性能随组成的变化很可能与其基质中晶粒间的结合方式有关。研究发现：纯度为 99% 的氧化铝(Al₂O₃)粉的烧结体中晶粒间的结合方式属典型的玻璃相结合，即：低熔点玻璃相在 Al₂O₃ 晶粒间贯穿分布^[13]。高温下，因玻璃相的软化或液化而导致材料的抗折强度降低，这就是样品 A0 的高温抗折强度(2.65 MPa)显著低于其常温(8.0 MPa)的原因。

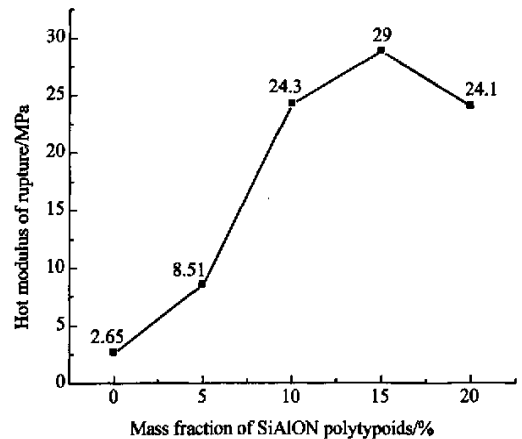


图 4 多型体 SiAlON 质量分数与 1 400 °C 样品的抗折强度
Fig.4 Hot modulus of rupture (1 400 °C) of samples vs SiAlON polytypoids mass fraction

研究表明:多型体 SiAlON 与刚玉晶粒之间、多型体 SiAlON 与多型体 SiAlON 晶粒之间多为直接结合,玻璃相孤立分布于三晶交界处^[5,14]。显然,随多型体 SiAlON 含量的增加,多型体 SiAlON 结合刚玉耐火材料基质中晶粒间直接结合的比例逐渐增大,导致其高温抗折强度逐渐提高。当多型体 SiAlON 含量为 15%时,材料的高温抗折强度达到最大,含量进一步增大至 20%时,材料的抗折强度又有所降低,显然是由于材料致密化程度较差的缘故(见图 2)。材料基质中晶粒间直接结合比例的提高意味着低熔点玻璃相相对材料高温抗折强度的影响逐渐减弱,所以,材料高温与常温抗折强度的差值随多型体 SiAlON 含量的提高逐渐减小。

2.4 多型体 SiAlON 结合刚玉材料的显微结构

图 5 为样品 A0 高温断口的低倍显微结构 SEM 照片。从图 5 可以看出:不含多型体 SiAlON 的刚玉材料的高温断口凸凹不平,完整的骨料形貌清晰可见,表明断裂沿骨料与基质的结合面发生,说明骨料与基质间的结合较弱,在应力作用下,材料沿骨料与基质的结合面断裂,从而使断口呈现出沿颗粒(骨料)断裂特征。

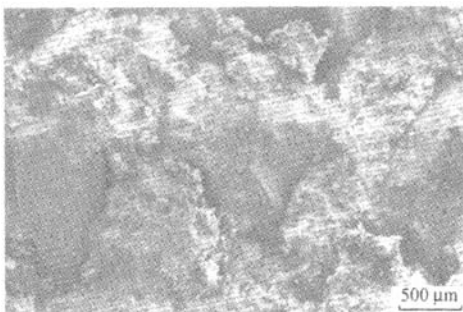


图 5 1400 °C 样品 A0 断口的 SEM 照片
Fig.5 Scanning electron microscope (SEM) photograph of fracture surface of sample A0 at 1400 °C

图 6 为样品 A0 基质的显微结构 SEM 照片。从图 6 可以看出:基质中细小的刚玉晶粒形状规则,表面光滑,呈现出沿晶断裂特征。这是因为基质中刚玉晶粒间的结合相为低熔点玻璃相,高温下其软化或液化将导致基质的断裂沿晶界进行。因此,不含多型体 SiAlON 的刚玉耐火材料的高温断裂模式为沿颗粒断裂和沿晶断裂。

图 7 为样品 A15 的高温断口形貌的低倍 SEM 照片。从图 7 可以看出:多型体 SiAlON 结合刚玉

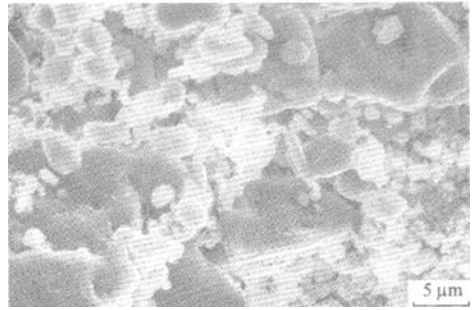


图 6 1400 °C 样品 A0 基质断口的 SEM 照片
Fig.6 SEM photograph of matrix in fracture surface of sample A0 at 1400 °C

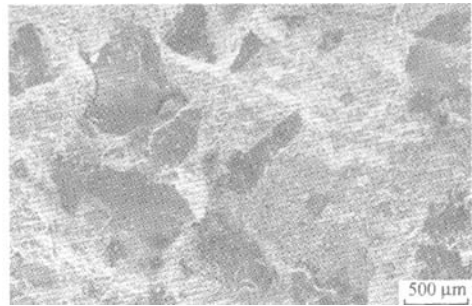


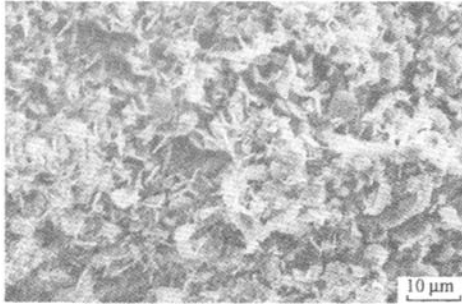
图 7 1400 °C 样品 A15 断口的 SEM 照片
Fig.7 SEM photograph of rupture surface of sample A15 at 1400 °C

材料的断面较平坦,刚玉骨料的断裂面清晰可见,基本上观察不到断裂沿骨料与基质结合面发生的情况,材料的断裂方式呈现出穿骨料断裂的特征。这表明骨料与基质间形成了较强的结合,骨料成为结构中相对薄弱的部分。

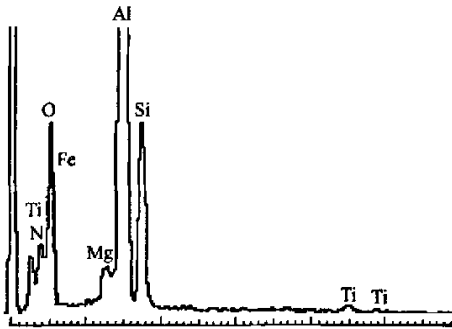
图 8 为样品 A15 基质高温断口的 SEM 照片及 EDS 谱。从图 8 可以看出:多型体 SiAlON 结合刚玉材料的基质中含大量的板状晶,EDS 分析表明:板状晶主要由 Si, Al, O, N 元素构成。结合图 1 的 XRD 分析结果可知:板状晶是多型体 SiAlON。

图 9 为断口中孔洞内多型体 SiAlON 的形貌的 SEM 照片。从图 9 可以看出:多型体 SiAlON 为发育良好的六方板状晶,因在断裂过程中没有受到破坏而保持完整规则的几何外形。

非空洞处的多型体 SiAlON 晶体则多呈现不规则板状,棱边凸凹不平(见图 10),表明基质中的多型体 SiAlON 晶体多发生穿晶断裂。这种高温抗弯条件下的断裂方式表明基质中晶粒(多型体 SiAlON



(a) SEM photograph



(b) Representative EDS result of plate-like grains

图 8 1400 °C 样品 A15 基质断口的 SEM 照片及 EDS 谱
Fig.8 SEM photograph and energy dispersive spectroscopy (EDS) pattern of matrix fracture surface of sample A15 at 1400 °C

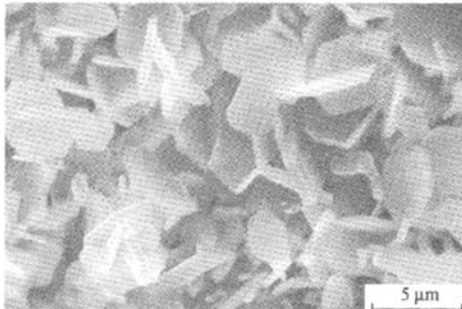


图 9 样品 A15 气孔中完整的板状多型体 SiAlON 晶体的形貌
Fig.9 Morphology of intact plate-like SiAlON polytypoids grains in pore of sample A15

与刚玉晶粒及多型体 SiAlON 晶粒自身)间具有足够高的结合强度,同时也在很大程度上表明晶粒间的结合方式是一种明显不同于玻璃相结合的结合方式——直接结合。显然,随多型体 SiAlON 引入量的增大,基质中晶粒间的直接结合比例大幅度提高,其断裂方式亦将逐渐转变为穿晶断裂为主。

综上所述,多型体 SiAlON 的引入使骨料与基

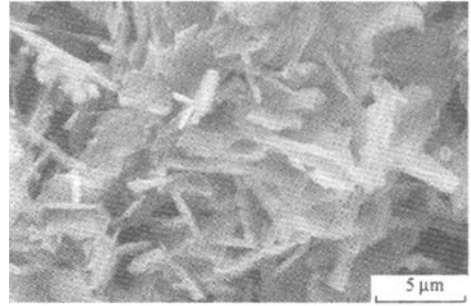


图 10 样品 A15 基质中断裂的板状多型体 SiAlON 晶体的相貌
Fig.10 Morphology of broken plate-like SiAlON polytypoids grains in matrix of sample A15

质之间、基质内部晶粒之间形成了牢固的结合,从而使多型体 SiAlON 结合刚玉耐火材料在高温下的断裂模式以穿骨料断裂和穿晶断裂为主,这就是其高温力学性能优良的原因。

3 结 论

(1) 以电熔白刚玉、矾土细粉、Al 粉和 Si 粉为原料,通过原位氮化反应烧结工艺在较低的温度(1 500 °C)下制备了多型体 SiAlON(12H, 21R)结合刚玉耐火材料。

(2) 随多型体 SiAlON 含量的增大,多型体 SiAlON 结合刚玉耐火材料的常温及高温抗折强度皆显著提高,当多型体 SiAlON 含量为 15%时,1 400 °C 的抗折强度可达 29 MPa,与其常温抗折强度相当。

(3) 多型体 SiAlON 结合刚玉耐火材料的高温断裂模式以穿骨料和穿晶断裂为主。

参考文献:

- [1] JACK K H. Review: sialons and related nitrogen ceramics [J]. *J Mater Sci*, 1976, 11(6): 1135-1140.
- [2] GAUCKLER L J, LUKAS H L, PETZOW G. Contribution to the phase diagram $Si_3N_4-SiO_2-AlN-Al_2O_3$ [J]. *J Am Ceram Soc*, 1975, 58: 346-347.
- [3] KOMEYA K, TSUGE A. Formation of AlN polytype ceramics and some of their properties [J]. *Yogyo-Kyokai-Shi*, 1981, 89: 615-620.
- [4] WANG P L, SUN W Y, YAN D S. Mechanical properties of AlN-polytypoids-15R, 12H and 21R [J]. *Mater Sci*, 1999, A272: 351-356.
- [5] LEE C S, DE JONGHE L C, THOMAS G. Novel joined of dissimilar ceramics in the $Si_3N_4-Al_2O_3$ system using polytypoid functional gradients [J]. *Acta Mater*, 2001, 49: 3 775-3 780.
- [6] 穆柏春. 陶瓷材料的强韧化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 231-238.
- [7] MU Baichun. Strengthening and Toughening of Ceramics (in Chinese). Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002. 231-238.
- [7] 桑少柏, 李亚伟, 李 楠. 21R(AlN 多型体)结合镁质耐火材料的制

- 备及性能研究[J]. 耐火材料, 2006, 40(40): 246-251.
SANG Shaobai, LI Yawei, LI Nan. Refrac Mater (in Chinese), 2006, 40(40): 246-251.
- [8] 王佩玲, 贾迎新, 孙维营. AlN-多型体陶瓷的研究 II. AlN-多型体的力学性能和微观结构[J]. 无机材料学报, 2000, 15(4): 756-760.
WANG Peiling, JIA Yingxin, SUN Weiying. J Inorg Mater (in Chinese), 2000, 15(4): 756-760.
- [9] 王佩玲, 贾迎新, 孙维营. AlN-多型体陶瓷的研究 I. AlN-多型体的形成及致密化[J]. 无机材料学报, 1999, 14(6): 881-886.
WANG Peiling, JIA Yingxin, SUN Weiying. J Inorg Mater (in Chinese), 1999, 14(6): 881-886.
- [10] WANG P L, JIA Y X, SUN W Y. Fabrication of 15R AlN-polytypoid ceramic [J]. Mater Lett, 1999, 41:78-82.
- [11] WANG P L, SUN W Y, YAN D S. Formation and densification of 21R AlN-polytypoid [J]. J Eur Ceram Soc, 2000, 20: 23-27.
- [12] 郭海珠, 余森. 实用耐火材料手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000. 154-155.
GUO Haizhu, YU Sen. Handbook on Refractory Raw Materials (in Chinese). Beijing: China Architectural Material Press, 2000. 154-155.
- [13] 斯温 M V. 陶瓷结构与性能[M]. 郭景坤等译. 北京: 科学出版社, 2000. 89-95.
SIWEN M V. Structure and Properties of Ceramics (in Chinese). GUO Jingkun, et al. transl. Beijing: Scientific Press, 2000. 89-95.
- [14] LEE C S, DE Jonghe L C, Thomas G. Mechanical properties of polytypoidally joined $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ [J]. Acta Mater, 2001, 49: 3767-3773.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※

第十九届中国国际玻璃工业技术展览会

第十九届中国国际玻璃工业技术展览会(China Glass 2008)将于 2008 年 4 月 10 日~13 日在中国国际展览中心举办。展会主办单位: 中国硅酸盐学会; 共同主办单位: 中国日用玻璃协会和中国建筑玻璃与工业玻璃协会; 承办单位: 北京中硅展览有限公司。

中国国际玻璃工业技术展览会是得到国家批准、每年举行一届(单年在上海、双年在北京)的国际玻璃工业技术展览会, 在国内外享有盛誉。历届展览会都得到了我国玻璃行业国家主管部门和全国性行业协会的全力支持。

展出内容涵盖玻璃行业各个方面的技术与产品, 包括: 玻璃制品及应用; 玻璃生产技术与设备、仪器仪表及检测装置、自动控制和各种配套系统; 玻璃深加工设备; 以及耐火材料、原材料和各种主、辅材料等。

2007 年 5 月在上海举办的第十八届中国国际玻璃工业技术展览会展出面积达 46,000 平方米, 有来自 24 个国家的参展商 707 家, 其中外国参展商 235 家, 包括: 德国、意大利、美国、比利时 4 个国家展馆。来自 110 多个国家的 3 万多专业观众参观了展会, 其中外国观众人数近 3000 人, 比上届增长 46.8%。国内外主流媒体对展会作了广泛报道。本展会已经发展成为亚洲领先和与德国杜塞尔多夫玻璃展、意大利米兰玻璃展齐名的世界三大玻璃展之一。

明年在北京中国国际展览中心举办的 China Glass 2008, 比历次展会又有明显扩大, 展览面积预期可到 5 万平米。无论是展出面积或是参展商数量都将大大超过上届展会。目前招展形势很好, 80% 展位已被预订。

围绕展会还将举办有关技术讲座和研讨会, 将吸引国内外商家与专家与会。因此中国国际玻璃工业技术展览会不仅是中国玻璃行业的活动平台, 而且也是世界玻璃行业的活动舞台。热烈欢迎国内外厂家报名参展。

欲了解更多信息, 请访问 www.ceramsoc.com 或致电: 010-68345515, 68348131 或传真至: 010-68345392, 68349359。

作者: 栗娅敏, 张厚兴, 钟香崇, LI Yamin, ZHANG Houxing, ZHONG Xiangchong
作者单位: 郑州大学, 高温功能材料河南省重点实验室, 郑州, 450052
刊名: 硅酸盐学报 
英文刊名: JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY
年, 卷(期): 2007, 35(9)
被引用次数: 2次

参考文献(14条)

1. JACK K H [Review:sialons and related nitrogen ceramics](#) 1976(06)
2. GAUCKLER L J;LUKAS H L;PETZOW G [Contribution to the phase diagram Si₃N₄-SiO₂-AlN-Al₂O₃](#) 1975
3. KOMEYA K;TSUGE A [Formation of AlN polytype ceramics and some of their properties](#) 1981
4. WANG P L;SUN W Y;YAN D S [Mechanical properties of AlN-polytypoids-15R, 12H and 21R](#)[外文期刊] 1999
5. LEE C S;DE JONGHE L C;THOMAS G [Novel joined of dissimilar ceramics in the Si₃N₄-Al₂O₃ system using polytypoid functional gradients](#)[外文期刊] 2001(18)
6. 穆柏春 [陶瓷材料的强韧化](#) 2002
7. 桑少柏;李亚伟;李楠 [21R\(AlN多型体\)结合镁质耐火材料的制备及性能研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2006(40)
8. 王佩玲;贾迎新;孙维营 [AlN-多型体陶瓷的研究 II. AlN-多型体的力学性能和微观结构](#)[期刊论文]-[无机材料学报](#) 2000(04)
9. 王佩玲;贾迎新;孙维营 [AlN-多型体陶瓷的研究 I. AlN-多型体的形成及致密化](#)[期刊论文]-[无机材料学报](#) 1999(06)
10. WANG P L;JIA Y X;SUN W Y [Fabrication of 15R AlN-polytypoid ceramic](#)[外文期刊] 1999
11. WANG P L;SUN W Y;YAN D S [Formation and densification of 21R AlN-polytypoid](#)[外文期刊] 2000
12. 郭海珠;余森 [实用耐火材料手册](#) 2000
13. 斯温M V;郭景坤 [陶瓷结构与性能](#) 2000
14. LEE C S;DE Jonghe L C;Thomas G [Mechanical properties of polytypoidally joined Si₃N₄-Al₂O₃](#)[外文期刊] 2001(18)

本文读者也读过(7条)

1. 施鹰, 黄校先, 吴金源, 胡培 [CaO稳定ZrO₂耐火材料的制备和力学性能](#)[会议论文]-1998
2. 谭清华, 王玺堂 [不同气氛下SiAlON结合刚玉/SiC复合耐火材料的制备](#)[会议论文]-2008
3. 王中华, 陈天朗 [氮化硅在超声波辐照下的水解](#)[期刊论文]-[化学研究与应用](#)2003, 15(4)
4. 徐利华, 王体壮, 化金良, 张雷, 张殿一, 李文超 [新型生态耐火材料的制备工艺与再循环技术](#)[会议论文]-2004
5. 雒利宾, 冯涛 [一种制备高密度刚玉材料的新方法](#)[会议论文]-2011
6. 刘开琪, 宋慎泰, 洪彦若, 孙加林 [凝胶注模成型制备刚玉-尖晶石耐火材料](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2004, 38(5)
7. 禄向阳, 赵世杰 [Sialon结合刚玉耐火材料的制备](#)[会议论文]-1999

引证文献(2条)

1. 翟鹏亮, 叶国田, 钟香崇, 张海军, 梁敏 [造孔剂NH₄F和氮化温度对合成12H\(AlN-多型体\)的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2009(2)
2. 贾全利, 叶方保 [原位氮化生成Sialon结合刚玉浇注料的性能](#)[期刊论文]-[北京科技大学学报](#) 2010(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gsyxb200709018.aspx