

Formation of in Situ Si₃N₄ in the Cordierite-Si₃N₄ Composite Produced by Nano and Micro Silicon Particles

Somayeh Sharafi Zamir^{1*}, Majid Jafari¹, Amir Abas Nourbakhsh², Ahmad Monshi³

1- Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Najafabad branch, Isfahan, Iran

2- Department of Engineering, Islamic Azad University, Shahreza branch, Isfahan, Iran

3- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 Apr. 2010 Accepted: 18 Jul. 2010

Keywords:

Cordierite Silicon nitride Microstructure Composite pore size Nano silicon particles

ABSTRACT

In this study the effect of in situ Si_3N_4 formation in the microstructure of a Cordierite- Si_3N_4 composite using micro and nano silicon particles was investigated. It was found that micro and nano silicon particles have different reaction with the nitrogen in the matrix of cordierite at various temperatures. Result showed that using nano size silicon powder and increasing surface area formation of silicon nitride bonding will be increased which should be related to Si_3N_4 formation in low temperature and prevent to reacting with cordierite to form liquid phase during sintering. Additionally it was found that, it is possible to synthesis high porosity cordierite- Si_3N_4 composite with a good thermal shock resistance.

Corresponding author: Somayeh Sharafi Zamir, sharafi1413@yahoo.com



تشکیل Si₃N₄ به صورت درجا در کامپوزیت کوردیریت–Si₃N₄ سنتز شده با استفاده از نانو و میکرو ذرات سیلیکون

سمیه شرفی ضمیر '*، مجید جعفری'، امیر عباس نور بخش'، احمد منشی "

۱– دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد ۲– دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا ۳– دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این تحقیق تاثیر تشکیل Si ₃ N4به صورت درجـا بـا اسـتفاده از نـانو و میکـرو ذرات سیلیکون بر روی بدنههای کوردیریتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشـان دادند که واکنش نانو ذرات سیلیکون بـا نیتـروژن متفـاوت از میکـرو ذرات سـیلیکون در	تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/٤/۲۷
دماهای مختلف میباشد. با کاهش اندازه ذرات سیلیکون در ابعاد نــانو و افــزایش سـطح	واژگان کلیدی:
ویژه ذرات، منجر به کاهش دمای تشکیل سیلیکون نایترایـد در کوردیریـت سـنتز شـده	كورديريت
میگردد، بنابراین مانع از تشکیل فاز مذاب کوردیریت در حـین تـفجوشـی و موجـب	سيليكون نايترايد
نزدیکی دمای تشکیل دو فاز میشود. همچنین، امکان تشکیل یک بدنـه متخلخـل سـاخته	ريزساختار
شده از کامپوزیت کوردیریت- Si ₃ N ₄ با شوک پذیری مناسب وجود دارد.	تخلخل
	نانوذرات سيليكون

* عهدهدارمكاتبات: سميه شرفي ضمير، sharafi1413@yahoo.com

۱ – مقدمه

در دهه اخیر کامپوزیتهای پایه کوردیریتی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. کوردیریت (2MgO.2Al₂O₃.5SiO₂) بدلیل ضریب انبساط حرارتی پایین، و مقاومت به شوک حرارتی بالا، ثابت دیالکتریک کم (٦-٥=٤) و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند: دیرگدازها، عایقهای حرارتی و صوتی، فیلترها، ممبرانها، المنتهای حرارتی، مبدلهای کاتالیستی و زیر پایههای چند لایهای بکارمیرود [٤-٢]. اما بدلیل محدوده پخت باریک کوردیریت امکان [٥-٦].

سیلیکون نایتراید (Si₃N4) بدلیل خواص مکانیکی و ترمومکانیکی خوب در دمای بالا می تواند یکی از مناسبترین مواد به عنوان اگریگیت و فاز اتصالی در کامپوزیتهای پایه کوردیریتی باشد [۷-۸]. بخصوص اینکه Si₃N₄ دارای استحکام بالا در دمای بالا، مقاومت به تنش حرارتی خوب، که باعث ضریب انبساط حرارتی یایین در مقایسه با سایر مواد دما بالا می باشد [۱۰-۹].

پیین از سایله با سیر مواد دیا با سیبست (۲۰۰۰ یا . در سال ۱۸۹۸، مطالعاتی بر روی سایتز کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ مناسب برای موتورهای دیازل انجام شد [۱2]. تحقیقات انجام شده نشان داد که، هدایت حرارتی این کامپوزیت کمتر از هدایت حرارتی Si₃N₄ تفجوشی شده (SSN) میباشد. همچنین کامپوزیت کوردیریت-Si3N₄ سنتز شده ضریب انبساط حرارتی پایین تر و کاهش کمتری در استحکام و چقرمگی نسبت به Si₃N₄ تفجوشی شده دارد [۱۲].

هدف از ایـن تحقیـق تشـکیل Si₃N₄ بصـورت درجـا در ماتریس کوردیریـت قبـل از تشـکیل فـاز مـذاب همـراه کوردیریت با استفاده از نانو ذرات سیلیکون و مقایسـه آن

با میکرو ذرات سیلیکون میباشد. همچنین تاثیر تغییرات نیتریداسیون که وابسته به اندازه ذرات سیلیکون و دمای واکنش میباشد، مورد بررسی قرار گرفته است. تشکیل Si₃N₄ بصورت درجا در ماتریس کوردیریت بوسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس (XRD)، ویژگیهای حرارتی توسط آنالیز حرارتی همزمان (STA) و ویژگیهای ریزساختاری کامپوزیت کوردیریت-هاSi₃N بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی گردید. نتایج حاصله نشان دادند که استفاده از نانوذرات سیلیکون موجب نشان دادند که این موضوع بدلیل کاهش درجه حرارت تشکیل فاز نیتریدی قبل از تشکیل فاز مذاب کوردیریت میباشد. همچنین نتایج نشان دادند که با ستفاده از نانو ذرات سیلیکون، امکان دستیابی به بدنه متخلخل با شوکپذیری مناسب وجود دارد.

۲- مواد و روشها

۲–۱– تهیه شاموت کوردیریت

مواد خام برای تهیه شاموت کوردیریت، شامل کائولن (Z.lids) با متوسط اندازه دانه ۵ میکرومتر، تالک (جندق) با متوسط اندازه دانه ۱۵ میکرومتر و Nabalox) با اندازه دانه کمتر از ۵۹۳ و خلوص ۸۹/۹ درصد می باشد. آنالیز شیمیایی مواد خام برای تهیه شاموت کوردیریت در جدول ۱ آورده شده است. ترکیب مواد مورد نیاز جهت ساخت شاموت کوردیریت بر اساس ترکیب استوکیومتریک برای ساخت کوردیریت (۳.w MgO=۱۳/۸ wt.) برای ساخت کوردیریت (۳.m مراه کوردیریت از آلومینا افزایش دیرگدازی فاز مذاب همراه کوردیریت از آلومینا استفاده گردید.

S. Sharafi zamir et al., Journal of Materials Science, Vol.2, No.3, 2010, 64-77

	L.O.I	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Mgo	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Raw materials
	13.25	0.03	1.02	0.36	0.25	0.17	0.85	36.7	47.1	Kolin (Z.lids)
	7	0.12	0.46	0.85	31.5	0.08	0.5	25	57.5	Talc (Gndagh)
	3.45	-	-	-	-	-	0.03	99.5	0.01	Alumina (Nabalox)

جدول ۱ – آنالیز شیمیایی مواد خام Table 1. Chemical composition of raw materials

ترکیب به مدت ۳ ساعت در دماهای مختلف پخت و به منظور تعیین انتخاب بهترین نمونه با بیشترین دانسیته از روش ارشمیدس استفاده شد. فازهای کریستالی نمونههای کوردیریت تفجوشی شده به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس (Philips PW3710) در ۲۰K۷ و ۲۰mA با استفاده از ۲uKa مشخص گردید. ابتدا مواد اولیه برای تهیه شاموت کوردیریت، پس از توزین، در آسیاب گلولهای با گلوله های از جنس آلومینا به مدت ۲۵ ساعت به صورت تر آسیا شدند. دوغاب بدست آمده در خشک کن در دمای ۲۰۰۸ کاملاً خشک گردید. نمونهها بصورت قرصهایی با قطر ۲۰mm و ضخامت ۰۰mm توسط پرس تک محوری تحت فشار ۰۰MPa پرس شدند. نمونههای پرس شده در هر



Fig. 1. Particel size analysis distribution of nano size silicon particles

۲-۲- آماده سازی پودر نانو سیلیکون: پودر سیلیکون اولیه (Elkem) با متوسط اندازه دانه ۱۵µm برای تهیه نانو سیلیکون مورد استفاده قرار گرفت. پودر سیلیکون به روش مکانیکی در آسیاب سیارهای پر انرژی، در جارهای پلیمری به دلیل جلوگیری از آلودگی آهن با استفاده از گلولههای زیرکونیایی با دو قطر متفاوت آهن با استفاده از گلولههای زیرکونیایی با دو قطر متفاوت آسیاب شد. اندازه ذرات سیلیکون توسط دستگاه آسیاب شد. اندازه ذرات سیلیکون توسط دمی گردید، توزیع اندازه ذرات در شکل ۱ ملاحظه می شود.

۲-۳- تهیه کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄

بهترین نمونه با بیشترین دانسیته از شاموت کوردیریت که در دماهای مختلف پخت داده شده بودند، انتخاب شده و سپس نمونههای پخت داده شده خرد، آسیاب و از الک ۳۲ مش عبور داده شده و سپس با ۱، ۳، ۵ و %۱۰ سا پودر نانو سیلیکون مخلوط شدند. در جهت مقایسه رفتار نانو ذرات سیلیکون مخلوط شدند. در جهت مقایسه رفتار میکرو ذرات سیلیکون در کامپوزیت کوردیریت-۱۰ Si میکرو ذرات سیلیکون نیز با همین نسبت استفاده شد. میپس به صورت قرصهایی با قطر ۲۰۳۳ و ضخامت مری محوری، سپس به صورت قرصهایی با قطر ۲۰۳۳ و ضخامت در قالبهایی از جنس فولاد زنگ نزن، پرس شدند. بدنههای پرس شده در دماهای ۱۱۰۰، ۱۱۰۰، ۱۱۰۰، (Exciton Model: می محمی محمی محمی محمی انتر وژن با دبی حجمی

۱۰mlit/min پخته شدند. بدلیل گرمازا بودن واکنش نیتریداسیون، کنترل دقیق عملیات حرارتی را باید انجام می گرفت. نرخ حرارت دهی حدود C/min°۵ با ۲ ساعت زمان ماندگاری در دمای C° ۲۰۰ و ۳ ساعت زمان ماندگاری در دمای ماکزیمم برنامهریزی گردیـد. دانسـیته بالک و تخلخلهای باز به روش ارشمیدس محاسبه گردید. فازهای کریستالی نمونههای تفجوشی شده به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس در ٤٠KV و ٣٠mA با استفاده از انجام شد. ریز ساختار نمونههای تـفجوشـی شـده K_a Cu توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مـورد بررسـی قـرار گرفت (Model:Vega//Tescan). همچنین جهت تعیین دمای شروع واکنش نیتریداسیون، ازآنالیز حرارتی همزمان (Model:Labsys-Setaram) (STA) در اتمسفر نیتروژن تا دمای C° ۱٤۰۰ با نرخ حرارتدهی حدود ۱۴۰۰° ۱۰ استفاده شد. سطح ویـژه ذرات نـانو سـیلیکون بـه روش Model:1042-Costech) BET) اندازهگیری گردید.

۳– نتايج و بحث

۲−۲⊣نتخاب نمونه بهينه شاموت كورديريت

بعد از تهیه شاموت کوردیریت، برای تعیین دانسیته از روش ارشمیدس استفاده شد. نمونه با بیشترین دانسیته در هر دما انتخاب و سپس به منظور تعیین بیشترین فاز کریستالی در شاموت کوردیریت از آنالیز تفرق اشعه ایکس استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است.

S. Sharafi zamir et al., Journal of Materials Science, Vol.2, No.3, 2010, 64-77



A: Curundum, E: Spinel

ذرات نانو سیلیکون بوده که توسط بررسی آنالیز فازی (XRD) نمونههای تفجوشی شده در C°۱۱۰۰ اثبات گردید. همانطور که ملاحظه می گردد کوردیریت، Si₃N₄ اسپینل و کوراندوم در آنالیز فازی وجود داشته و در محدوده دمایی بالاتر فاز جدید دیگری مشاهده نگردیده است. در محدوده دمایی C°۱۳۰۰–۱۲۵۰ سه پیک کوچک گرمازا دیده میشود که احتمالا به تشکیل کوردیریت ارتباط دارد [۱۵]. همچنین پیک گرماگیری که درحدود دمای C°۱٤۰۰ دیده میشود، به ذوب سیلیکون در ابعاد نانو مربوط میشود. **Si₃N₄-۲-آنالیز حرارتی کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄** نتایج بررسی آنالیز حرارتی برای تعیین دمای شروع واکنش نیتریداسیون از مخلوط خام پودر کوردیریت و پودر نانو سیلیکون تا ماکزیمم دمای ۱٤۰۰ درجه سانتی گراد تحت اتمسفر نیتروژن انجام گردید که نتایج آن می دهد که اولین پیک گرماگیر در حدود دمای ۲۰۰۵ به کاهش وزنی در اثر از دست دادن آب ساختاری و دومین پیک گرماگیر در ۲۰۰۵ به دهیتراته شدن کائولینیت مربوط می شود. پیک گرمازایی که در محدوده دمایی بین

S. Sharafi zamir et al., Journal of Materials Science, Vol.2, No.3, 2010, 64-77



شکل ۳- آنالیز حرارتی از کامپوزیت کوردیت و نانو و سیلیکون تفجوشی شده در دمای ۲۰۰°۱۶در اتمسفر نیتروژن Fig. 3. Differential thermal analysis of Cordierite and nano silicon powder sinterd at 1400°C in the nitrogen







طوریکه در ۲۵٬۰۰۵ ما بیشترین شدت را برای فاز کریستالی Si₃N4 مشاهده میکنیم. اگرچه شدت پیکهای Si₃N4 در کامپوزیت کوردیریت-Si₃N4 با استفاده از ذرات سیلیکون با سایز میکرو نیز با افزایش دما افزایش می یابد، اما شدت این پیکها کمتر از پیکهای گرفته شده با استفاده از پودر سیلیکون با سایز نانو می باشد. شدت پیکهای کوردیریت و اسپینل تقریبا ثابت هستند اما با افزایش دما شدت پیکهای کوراندوم کاهش می یابد. ۳-۳ - آنالیز فازی کامپوزیت کوردیریت - Si₃N₄ با استفاده از نانو و میکرو ذرات سیلیکون شکلهای ٤ و ٥ الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) برای کامپوزیت کوردیریت - Si₃N₄ با ۱۰۰۳۴ نانو و میکرو سیلیکون در دماهای ۲۰۰٬۱۲۰، ۱۱۰۰٬۱۲۰ و ۲۰۰۰۳ اسیلیکون در دماهای دان الگو کوردیریت بعنوان فاز اصلی به همراه آن Si₃N₄، اسپینل (Si₃N₄) و کوراندوم نیز مشاهده می گردد. در شکل ٤ مشاهده می شود که با افزایش دما شدت پیکهای Si₃N₄ افزایش می یابند به



ميكرو سيليكون



نشریه علم مواد، سال دوم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۹

(۲۳۳²/gr) واکنش پذیری سیلیکون با گاز ازت زیاد شده و عمق نفوذ نیتروژن به دلیل استفاده ذرات با سایز کوچکتر افزایش مییابد و به همین دلیل مقدار بیشتری از Si₃N₄ در مقایسه با استفاده از ذرات با سایز میکرون تشکیل شده و رشد کریستالهای آن نیز افزایش مییابد [۳]. از طرف دیگر به دلیل محدوه باریک پخت کوردیریت، استفاده از نانو ذرات سیلیکون موجب کاهش دمای تشکیل سیلیکون نایتراید میگردد، بنابراین از ذوب کوردیریت در طی فرایند تفجوشیینگ در دمای بالا جلوگیری کرده و عدم حضور فاز مذاب باعث بهتر نیتریده شدن قطعه بخصوص در عمق آن میگردد. نکته جالب توجه تشکیل Si₃N₄ در دمای C^o ۹۰۰ با استفاده از ذرات نانو سیلیکون میباشد (شکل ۲). هرچند شدت پیک های Si₃N₄ تشکیل شده با استفاده از ذرات نانو سیلیکون ضعیف بوده اما نشان دهنده تشکیل این فاز در دمای کمتری نسبت به دمای تشکیل آن میباشد. با استفاده از ذرات میکرو سیلیکون این فاز مشاهده نگردید (شکل ۷). در فرایند نیتریده کردن مستقیم سیلیکون فلزی، ابتدا فیلم ناز کی از Si₃N₄ روی سطح ذرات Si تشکیل میشود و به مرور نیتروژن از این لایه به داخل ذره نفوذ میکند تا کل ذره تبدیل به سیلیکون نایتراید شود. با کاهش انداره ذرات در اندازه نانو و افزایش سطح ویژه



شکل ۲-الگوی پراش پرتو ایکس از کامپوزیت کوردیت-Si₃N₄ با ۳wt% نانوسیلیکون سنتز شده در ۹۰۰°C

Fig. 6. XRD patterns of Si3N4-cordiearite composite, with 3%wt nano silicon particles synthesis in 900°C





می باشد که این به دلیل افزایش حجم در اثر تبدیل Si به Si₃N₄ می باشد. افزایش تخلخل ناشی از افزایش حجم در کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ نیز بدلیل افزایش نیتریداسیون ذرات نانو سیلیکون است. توزیع اندازه تخلخلها با کاهش اندازه ذرات سیلیکون به مقادیر بالاتری افزایش می یابد. زیرا سطح ویژه برای ذرات نانو سیلیکون (m2/gr ۱۳–۱۲) بیشتر از ذرات میکرو سیلیکون افزایش حجم بیشتری خواهیم داشت. ۳-٤-تاثیر میکرو و نانو ذرات سیلیکون بروی دانسیته Si₃N₄-ییت کوردیریت-Si₃N₄ شکل ۸ و ۹ منحنی دانسیته و تخلخل کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ با استفاده از ۱۰۳۳ نانو و میکرو ذرات سیلیکون که در دما ۱۰۱۰- ۲۰۰۰° تف جوشی شدهاند، نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میگردد، دانسیته در هر دو کامپوزیت با افزایش دما کاهش مییابد. کاهش دانسیته در کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ با استفاده از نانو ذرات سیلیکون بیشتر از میکرو ذرات سیلیکون



شکل ۸- منحنی دانسیته کامپوزیت کوردیت-Si₃N₄ با ۱۰%wt نانو و میکروسیلیکون،تفجوشی شده در دماهای مختلف. ▲میکرو، ∎نانو Fig. 8. Density of Si₃N₄ –Cordierite composite with 1, 3, 5and 10%wt nano and micro silicon particles. sinterd at different temperature. ▲ nano, ∎micro



اشکل ۹- منحنی میزان تخلخل کامپوزیت کوردیت- Si_3N_4 با ۱، ۳، ۵ و ۱۰% نانو و میکرو سیلیکون تفجوشی شده در Si_3N_4 -Cordierite composite with 1, 3, 5 and 10% nano and micro silicon particles sinterd at 1100 °C

۳–۵– تــاثیر نــانو و میکـرو ذرات ســیلیکون بـر روی ریزساختار کامپوزیت کوردیریت–Si₃N₄ سنتز شده در دماهای ۱۱۰۰ و ^C° ۱۳۰۰

شكل a-b ۱۰ تصوير ميكروسكوپ الكتروني كامپوزيت کوردیریت–Si₃N₄ سنتز شده با استفاده از %۱۰wt میکرو و نانو سيليکون در دماي C⁰۰۱۱۰۰ و شکل ۸ c-d کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ سنتز شدہ با ہمان نسبت در دمای C° ۱۳۰۰ را نشان میدهد. نتایج آنالیز EDS نشان می دهد که ذرات خاکستری شامل عناصر Al، Mg و Si ذرات سفید شامل عناصر Si و N می باشند. ب مقایسه شکل a-b ۸ و c-d و c-d و میوزیت سنتز شده با استفاده از ذرات نانو سیلیک___ون ریزساختار Si₃N₄ ریزتر و هموژن تر از ریز ساختار به دست آمده با ذرات میکرو سیلیکون می باشد. هر چند در بعضی قسمتها آگلومره شدن مشاهده می شود. این نشان میدهـد کـه بـا كاهش اندازه ذرات در حد نانو و افزایش سطح ویژه سیلیکون، واکنش دهی با گاز نیتروژن بیشتر شده و ساختار یکنواختری از بلورهای Si₃N₄ بدست آمده است. از طرفی، جداسازی فازی بین کوردیریت و Si₃N₄ بدلیل اختلاف دمای ذوب بین کوردیریت و Si₃N₄ مشاهده مې شو د.

در این تصاویر تشکیل فاز نایتراید بروی سطح کوردیریت آگلومره شـده بـا مورفولـوژی هـم محـور بخـوبی دیـده میشود. با افزایش بیشتر دما تا ۲۳۰۰° کـه نزدیـک بـه

دمای ذوب کوردیریت میباشد مورفولوژیهای مختلفی از سیلیکون نایتراید مشاهده میشود (شکل ۱۰ b). مورفولوژی اول سوزنهای بلندی با ارتفاع µµ و قطر چند نانومتر (قسمتهایی که در شکل ۱۰-b نشان داده شده است) دیگری ذرات هم محور کوچکی در حد میکرومتر که در بعضی قسمتها به صورت آگلومره در آمدهاند که میتواند به مکانیزم SDP (انحلال، رسوب، نفوذ) مربوط میشود. مورفولوژی سوزنی شکل از طریق مکانیزم بخار – مایع – جامد تشکیل میشوند [۱۳] میتوید دایل فاز مایع را در این دما تایید میکند که میتواند دلیل خوبی برای استفاده از نانو سیلیکون برای کاهش دمای تشکیل سیلیکون نایتراید باشد.

٤- نتيجه گيرى

تشکیل Si₃N₄ به صورت درجا در کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ تحت تاثیر اندازه ذرات سیلیکون و توزیع اندازه ذرات سیلیکون میباشد. با استفاده از ذرات کوچکتر در اندازه نانو و افزایش سطح ویژه نرخ واکنش در دمای پایین افزایش مییابد. کاهش اندازه ذره باعث افزایش نیتریداسیون در دمای پایینتر و منجر به کاهش دمای نهایی واکنش میگردد. به دلیل تشکیل Si₃N₄درجا در کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ و افزایش حجم مقدار زیادی تخلخل در ماتریس باقی میماند.

Archive of SID

S. Sharafi zamir et al., Journal of Materials Science, Vol.2, No.3, 2010, 64-77



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) کامپوزیت کوردیریت-Si₃N₄ سنتز شده با استفاده از a) 10%wt (a) میکرو سیلیکون در دمای C[°] ۲۰۰۰ (b) نانو سیلیکون در دمای C[°] ۲۰۰۰ (c) میکرو سیلیکون دردمای C[°] ۲۰۰۰ (c) نانوسیلیکون در دمای Fig. 10. Scanning electron micrographs of Si₃N₄-cordierite composite with 10wt%, (a) micro silicon at 1100 °C, (b) Nano silicon at 1100°C, (c) micro silicon at 1300°C, (d) Nano silicon at 1300°C.

نشریه علم مواد، سال دوم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۹

www.SID.ir

after exposure in industrial gas turbines", Journal of Europian Ceramic Society, Vol. 22, 2002, pp. 2789–2797.

[9] V. Pavarajarn, T. Vongthavorn, P. Praserthdam, "Enhancement of direct nitridation of silicon by common metals in silicon nitride processing", Ceramic International, Vol. 33, 2007, pp. 675–680.

[10] A. Demir, Z. Tatli, F. Caliskan, A.O. Kurt, "Carbothermal reduction and nitridation of quartz mineral for the production of alpha silicon nitride powders", Materials Science Forum, Vol. 554, 2007, pp. 163–168.

[11] M.D. Alcala, J.M. Criado, C. Real, "Influence of the experimental conditions Predecki", P. and Haas, J., "Structural aspects of the lattice thermal expansion of hexagonal cordierite", Journal of American Ceramic Society, Vol. 70, 1987, pp. 175–182.

[12] R.M. Smart, F.P. Glasser, "The subsolidus phase equilibria and melting temperatures of MgO–Al2O3–SiO2", Ceramic International, Vol. 7 (3), 1981, pp. 90–97.

[13] A.J. Pyzik, D.F. Carrol, "Technology of Self-Reinforced Silicon. Nitride" Annual Review of Materials Science, Vol. 24, 1994, pp. 189-214.

[14] F. Chang, T. Liou1, F. Tsai, "The nitridation kinetics of silicon powder compacts", Thermochimica Acta, Vol. 354, 2000, pp. 71-80.

[15] Sh. Liu, Y. Zeng, D. Jiang, "Fabrication and characterization of cordierite bonded porous SiC ceramics", Ceramics International, Vol. 35 (2), 2009, pp. 597-602.

[1] M. Nogami, S. Ogawa, K. Nagasaki, "Preparation of cordierite glass by sol–gel process", Journal of Materials Science, Vol. 24, 1989, pp. 4339–4342.

[2] A.M. Kazakos, S. Komarneni, R. Roy, "Sol–gel processing of cordierite: effect of seeding and optimisation of heat treatment", Journal of Materials Research, Vol. 5, 1990, pp. 1095–1103.

[3] J.H. Jean, T.K. Gupta, "Liquid-phase sintering in the glass-cordierite system", Journal of Materials Sciences, Vol. 27, 1992, pp. 1575–1584.

[4] S.H. Knickerbocker, A.H. Kumar, L.W. Heron, "Cordierite glassceramics for multilayer ceramic packaging", American Ceramic Society Bulltin, Vol. 72 (1), 1993, pp. 90–95.

[5] K. Sumi, Y. Kobayashi, E. Kato, "Low temperature fabrication of cordierite from kaolonite and magnesium hydroxide with boron oxide additions", Journal of American Ceramic Society, Vol. 82 (3), 1994, pp. 783–785.

[6] R. Petrovic, Dj. Janackovic, S. Zec, S. Drmanic, Lj. Kostic-Gvozdenovic, "Phase-transformation kinetics in triphasic cordierite gel", Materials Research, Vol. 16 (2), 2002, pp. 451-458.

[7] K. Houjou, K. Ando, M.C. Chu, S.P. Liu, S. Sato, "Effect of sintering additives on the oxidation behavior of Si3N4 ceramics at 1300°C", Journal of Europian Ceramic Society, Vol. 25, 2005, pp. 559–567.

[8] H.T. Lin, M.K. Ferber, "Mechanical reliability evaluation of silicon nitride ceramic components

نشریه علم مواد، سال دوم، شماره سوم، تابستان ۱۳۸۹

76

مراجع