فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۴، شماره‌ی ۴، زمستان ۱۳۹۴

بررسی تاثیر بورات آلومینیوم و منیزیا بر خواص مکانیکی و ریز ساختاری بدنه‌های کوراندوم– مولایتی

نجمه نوروزی، رحیم نقی‌زاده*، حمیدرضا رضایی، ابراهیم قاسمی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

*rnaghizadeh@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹

کلید واژه:

بورات آلومینیوم، کوراندوم، مولایت، منیزیا، خواص مکانیکی

چکیده:

بدنه‌های کوراندوم–مولایتی از نظر دیرگدازی تحت بار و مقاومت در برابر خزش اهمیت فراوانی در صنعت دارند. به منظور بهبود زینتر این بدنه‌ها و همچنین کنترل ریز ساختار از افزودنی‌های مختلف استفاده می‌گردد که در این پژوهش تاثیر افزودن بورات آلومینیوم به تنهایی و بورات آلومینیوم و منیزیا باهم بررسی شده است. بورات آلومینیوم مصرفی توسط سنتز احتراقی با استفاده از محلول حاوی نیترات آلومینیوم، اسید بوریک و سوخت گلایسین تهیه شد. بدنه‌های کوراندوم–مولایت از مواد اولیه آلومینای تبولار، آلومینای گاما و کائولن دیاموند بهمراه افزودنی‌های مورد نظر پس از پرس کردن و پخت در دماهای مختلف ۱۵۵۰°C– ۱۴۰۰ تهیه شدند. نمونه‌های بدون افزودنی پس از پخت در ۱۵۵۰°C دارای استحکام خمشی ۳۸MPa و چگالی نسبی ۸۸٪ و فازهای اصلی کوراندوم و مولایت و فاز فرعی کوارتز بودند که پس از افزودن بورات آلومینیوم به میزان ۵٪ وزنی، استحکام خمشی به ۲۵MPa و چگالی نسبی به ۸۷٪ رسید که نمایشگر کاهش زینتر بود که بدلیل دیرگدازی بیشتر بورات آلومینیوم نسبت به مولایت بود. به منظور بهبود زینتر و ریزساختار از مخلوط‌های مختلف بورات آلومینیوم و منیزیا به میزان ۵٪–۱ وزنی استفاده شد که نمونه دارای ۵٪ مجموع دو افزودنی پس از پخت در دمای ۱۵۵۰°C استحکام خمشی حدود ۱۱۵ MPa و چگالی نسبی حدود ۹۵/۵٪ با فازهای بورات آلومینیوم و پیروپ ($3MgO.Al_2O_3.3SiO_2$) و احتمالا بورات منیزیم ($2MgO.B_2O_3$) علاوه بر فازهای اصلی کوراندوم و مولایت بود. نتایج ریزساختاری نمونه فوق نمایشگر حضور سوزن‌های درهم تنیده طویل و کوتاه مولایت و احتمالا بورات آلومینیوم در بین ذرات کوراندوم بود.

۱– مقدمه

مولایت دارای نقطه ذوب ۱۸۳۰°C، ضریب انبساط حرارتی $^{-1}$°C $\times 10^{-6}$ ۴/۵، ضریب هدایت حرارتی ۶w/m.k، استحکام فشاری ۲۰۰ MPa و چقرمگی شکست ۲/۵MPa.m$^{1/2}$ است. آلومینا دارای نقطه ذوب ۲۰۵۰°C، ضریب انبساط حرارتی $^{-1}$°C $\times 10^{-6}$ ۸، ضریب هدایت حرارتی ۲۶ w/m.k، و استحکام فشاری ۵۰۰ MPa و چقرمگی شکست ۴/۵ MPa.m$^{1/2}$ است [۱]. کامپوزیتی کردن زمینه آلومینا با مولایت موجب افزایش خواصی مثل

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

مقاومت شوک حرارتی و مقاومت خزشی می‌گردد، ضمن اینکه بدلیل ایجاد مکانیزم انحراف ترک و کشیده شدن سوزن‌های نازک مولایت در زمینه آلومینایی و همچنین تغییر مسیر رشد ترک، بر چقرمگی بدنه آلومینایی افزوده می‌شود[۲-۴]. افزودن پنج درصد حجمی مولایت ریز دانه به بدنه آلومینایی موجب تغییر مسیر رشد ترک از فضای بین دانه‌های آلومینا در بدنه‌های تک فاز کوراندومی به درون دانه‌های کوراندوم در کامپوزیت آلومینا-مولایت می‌گردد و چون استحکام درون دانه ای آلومینا بالا است عملا رشد ترک بسیار کند می‌گردد[۲].

بر روی واکنش رس‌ها یا کائولینیت با آلومینا پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است [۷-۵]. حین حرارت دادن مخلوط رس با آلومینا، مولایت اولیه شبه مکعبی و سیلیس آمورف در حوالی ۱۰۰۰°C تشکیل می‌شود و در دماهای بالای ۱۳۰۰°C بدلیل انحلال آلومینا در فاز مایع، مولایت سوزنی شکل ایجاد می‌شود. تغییرات چگالی نسبی مخلوط رس با آلومینا نشان می‌دهد که در دماهای حوالی ۱۳۰۰-۱۵۰۰°C که در آن واکنش بین فاز مذاب و آلومینا و تشکیل مولایت ثانویه رخ می‌دهد چگالی نسبی به مقدار جزیی افت می‌کند ولی با افزایش دما به ۱۶۰۰°C چگالی نسبی افزایش و به بالای ۹۰٪ می‌رسد. دلیل این امر مصرف فاز آمورف و تفاوت چگالی‌های تئوری اجزا است. رس‌ها به تنهایی در بالای ۱۵۰۰°C افت چگالی شدیدتری بدلیل حضور ناخالصی Fe_2O_3 و تبدیل آن به Fe_3O_4 و اکسیژن گازی دارند. در حضور آلومینا بدلیل انحلال Fe_2O_3 در Al_2O_3 به میزان بیش از ۱۵٪ وزنی در بالای ۱۴۰۰°C این پدیده رخ نمی‌دهد [۶].

به منظور بهبود زینتر و بهبود ریزساختار بدنه‌های آلومینایی از افزودنی‌های مختلف مثل MgO، Y_2O_3 [۵و۸]، La_2O_3 و CeO_2 [۹]، بورات آلومینیوم [۱۰] استفاده می‌شود. منیزیا دمای زینتر بدنه‌های کوراندوم-مولایت را کاهش داده و ریز ساختار هموژن تری ایجاد می‌کند. دمای شروع تشکیل مذاب در سیستم حاوی مخلوط آلومینا-رس-افزودنی منیزیا حوالی ۱۴۲۵°C است و در بالای ۱۵۷۸°C فازهای کوراندوم، مولایت و مایع وجود دارد که موجب زینتر در حضور فازمایع می‌گردد و از مذاب فوق هنگام سرد کردن اسپینل‌های $MgAl_2O_4$ در بین سوزن‌های مولایت بلورینه می‌شود. ضمنا منیزیا می‌تواند زینتر نفوذ شبکه‌ای آلومینا را نیز افزایش دهد [۵].

در سیستم Al_2O_3-B_2O_3 ترکیب‌های مختلفی نظیر Al_5BO_9، $Al_{18}B_2O_{15}$ و $Al_4B_2O_9$ وجود دارد که بورات آلومینیوم $9Al_2O_3.2B_2O_3$ معروف ترین ترکیب در این سیستم است که از لحاظ ساختاری شبیه مولایت است و حاوی اکتا هدرال‌های AlO_6 و تترا هدرال‌های AlO_4 و مثلث‌های B_2O_3 و برخی اتمهای Al با کوردیناسیون پنج اکسیژنی است [۱۲- ۱۰]. این ترکیب دارای نقطه ذوب ۱۹۵۰°C، ضریب انبساط حرارتی $۴/۲\times۱۰^{-۶}\ °C^{-۱}$ و چگالی تئوری $۲/۶۸g/cm^3$ است[۱۰]. این ماده از روش‌های مختلف مثل واکنش پودرها و روش احتراقی سنتز می‌گردد که در روش احتراقی از محلول آبی نیترات آلومینیوم، اسید بوریک و سوخت اوره یا استات آمونیوم و حرارت دهی تا ۵۰۰°C استفاده می‌شود. بورات آلومینیوم بدست آمده از سوخت اوره بلورین و از سوخت استات آمونیوم آمورف است [۱۳].

بین $9Al_2O_3.2B_2O_3$ و مولایت ۳:۲ ($3Al_2O_3.2SiO_2$) و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

۲:۱ ($2Al_2O_3.SiO_2$) محلول جامد وجود دارد که می‌توان آن را بصورت جایگزینی B بجای Si و بصورت فرمول $Al_{4.64}Si_{1.16}B_{0.2}O_{9.58}$ در مقایسه با فرمول مولایت ۳:۲ یعنی $Al_{4.5}Si_{1.5}O_{9.75}$ بیان کرد که در واقع این جایگزینی همراه با ایجاد جاهای خالی بیشتر اکسیژنی در شبکه است [۱۱و۱۳]. به این محلول‌های جامد گاهی اوقات بورن- مولایت (B-mullite) گفته می‌شود و میزان جایگزینی بور تا حدود ۱۵٪ سیلیسیم است. در صورت وجود آلومینا همراه مولایت در بدنه میزان جایگزینی به حدود دو برابر می‌رسد. حرارت دادن طولانی مدت بورن-مولایت در حوالی ۱۴۰۰°C موجب تجزیه آن به مولایت خالص و آلومینای آلفا می‌گردد. بورن- مولایت نسبت به مولایت ضریب انبساط حرارتی کمتری دارد [۱۲]. البته سیستم در Al_2O_3-SiO_2-B_2O_3 علاوه بر ترکیب‌های ذکر شده امکان ایجاد ترکیب بورال سیلیت (boralsilite) نظیر $Al_{1.6}Si_2B_6O_{37}$ نیز وجود دارد [۱۲و ۱۴].

هدف این پروژه بررسی تاثیر بورات آلومینیوم به تنهایی و بهمراه منیزیا بر روی زینتر و خواص مکانیکی و ریزساختاری بدنه‌های کوراندوم-مولایت تهیه شده از مخلوط انواع آلومینا و کائولن بوده است. بورات آلومینیوم مورد استفاده توسط روش احتراقی سنتز شده و سپس در بدنه‌ها استفاده شده است.

۲- فعالیت تجربی

برای تهیه کامپوزیت ٪۶۰ وزنی کوراندوم و ٪۴۰ وزنی مولایت، از مخلوط حاوی ٪ ۵۶ وزنی آلومینای تبولار زیر d_{40} ۱ µm (شرکت Alcoa)، ٪۲۰ آلومینای گاما‌ی زیر ۱ µm (شرکت مرک) و ۲۴ درصد وزنی کائولن دیاموند استفاده شد که آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد اولیه مصرفی

مواد اولیه	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	Fe_2O_3	L.O.I
کائولن دیاموند	۳۸/۰۴	۴۵/۷۷	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱۸	۰/۰۸	۱/۴۰	۰/۷	۱۳/۵۵
آلومینای تبولار	۹۹/۴	۰/۰۶	۰/۰۸	-	-	۰/۴	-	۰/۰۳	-
آلومینای گاما	۹۹/۴۲	۰/۰۲	۰/۰۴	-	-	۰/۵	-	۰/۰۲	-

مواد اولیه ذکر شده با افزودنی‌های بورات آلومینیوم سنتزی و منیزیای شرکت مرک و محلول چسب پلی ونیل الکل (PVA) مخلوط شده و سپس در قالب‌های استحکام خمشی با ابعاد $4 \times 5 \times 60\ mm^3$ و استحکام فشاری با قطر ۲۰mm و ارتفاع حدود ۳۰mm با فشار ۲۵۰MPa پرس شدند. پس از خشک کردن، نمونه‌ها در کوره الکتریکی در دماهای ۱۴۰۰-۱۵۵۰°C در اتمسفر معمولی با زمان ماندگاری سه ساعت در دمای ماکزیمم پخت شدند و سپس در کوره سرد شدند. پس از آن چگالی بالک و درصد تخلخل باز به روش ارشمیدس و با استفاده از آب جوش، استحکام خمشی بصورت سه نقطه ای و فاصله تکیه‌گاه ۵۰ mm و استحکام فشاری با اعمال نیروی عمودی بر سطح مقطع

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

تعیین شد. بر روی مخلوط خام برخی از نمونه‌ها آنالیز حرارتی (DTA+TGA) (دستگاه NETZSCH STA) انجام شد و برای نمونه‌های پخت شده آنالیز پراش اشعه X (دستگاه Philips با لامپ مسی λ=1.546Å) و بررسی ریزساختاری میکروسکوپ الکترونی (مدل TESCAN VEGA3) مجهز به سیستم EDS انجام گردید.

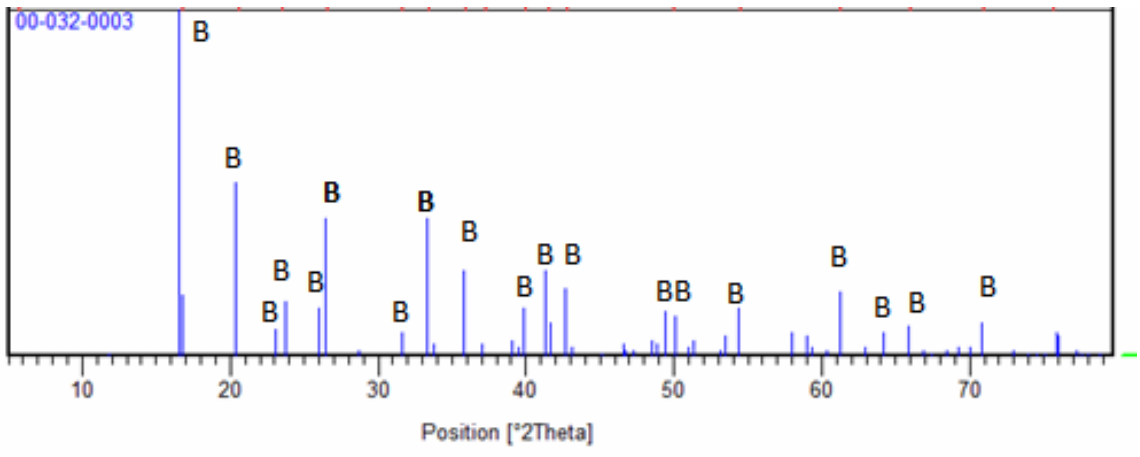
سنتز بورات آلومینیوم به روش احتراقی با استفاده از محلول حاوی نیترات آلومینیوم، اسید بوریک و سوخت گلایسین انجام شد. سنتز بورات آلومینیوم بر اساس محاسبات نسبت سوخت (گلایسین) به اکسید کننده‌ها (نیترات آلومینیوم) بصورت استوکیومتری انجام شد و با در نظر گرفتن ظرفیت ۴+ برای C، ۱+ برای H، ۳+ برای Al و ۲- برای اکسیژن و صفر برای نیتروژن محاسبه انجام شد و رابطه زیر موازنه گردید:

$$18Al(NO_3)_3.9H_2O_{(aq)}+4H_3BO_{3(aq)}+30NH_4C_2OOH_{(aq)} \rightarrow 9Al_2O_3.2B_2O_{3(s)}+60CO_2(g)+15N_{2(g)}+228H_2O_{(g)}$$

پس از مخلوط کردن ۱۹/۱۵ گرم نیترات آلومینیوم آبدار، ۰/۷ گرم اسید بوریک و ۶ گرم گلایسین در ۱۰۰cc آب ابتدا محلول شفاف بدست آمد و سپس با استفاده از گرم‌کن ۵۰°C ویسکوز شد. آنگاه حرارت گرم‌کن به ۴۰۰°C رسانده شد که احتراق انجام شد و پودر اسفنجی بدست آمد. پودر فوق در ۱۰۰۰°C به مدت دو ساعت کلسینه شد و الگوی پراش اشعه X آن تهیه شد.

۳- نتایج و بحث

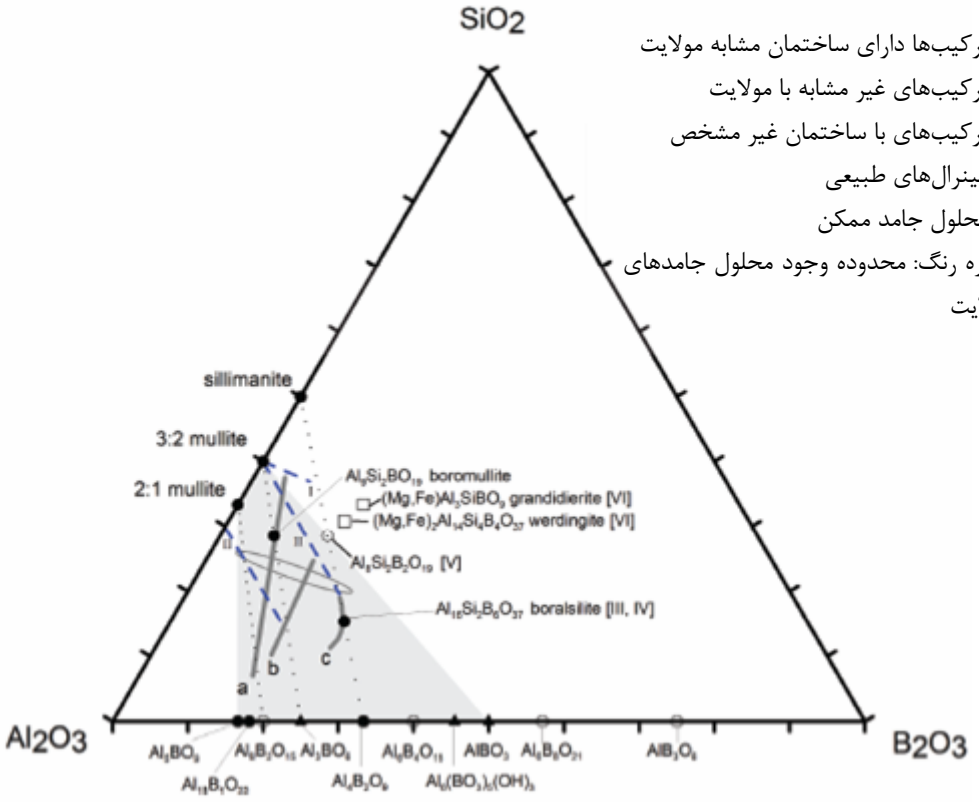
شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس X فاز بورات آلومینیوم را نشان می‌دهد که نمایشگر تشکیل بورات مورد نظر در دمای کلسینه شدن ۱۰۰۰°C است. مطابق دیاگرام سه جزیی کامل نشده (شکل ۲) Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2 بورات‌های آلومینیوم متعدد وجود دارد که برخی از آن‌ها دارای ساختمان مشابه مولایت هستند که ترکیب سنتز شده نیز این‌گونه است.



شکل ۱- الگوی پراش اشعه X بورات آلومینیوم سنتز شده به روش احتراقی پس از کلسینه شدن در ۱۰۰۰ °C

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]



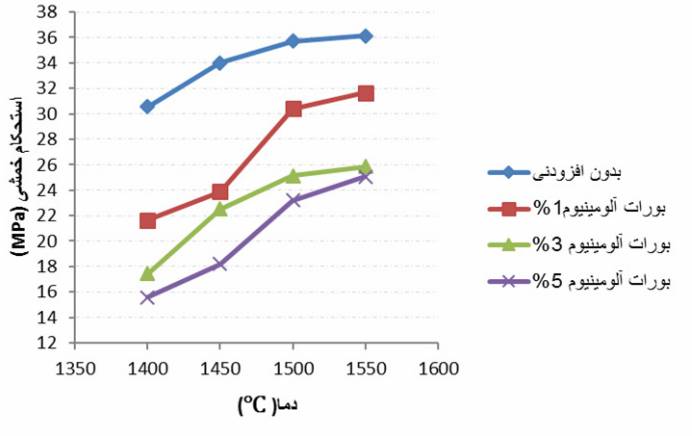
شکل ۲- دیاگرام سه جزیی Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2 [۱۲]

در شکل ۳ استحکام خمشی و در شکل ۴ استحکام فشاری نمونه‌های مختلف فرمولاسیون مرجع (بدون افزودنی) و فرمولاسیون‌های حاوی ۱ و ۳ و ۵ درصد بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف ۱۴۰۰-۱۵۵۰°C به مدت سه ساعت آورده شده است.

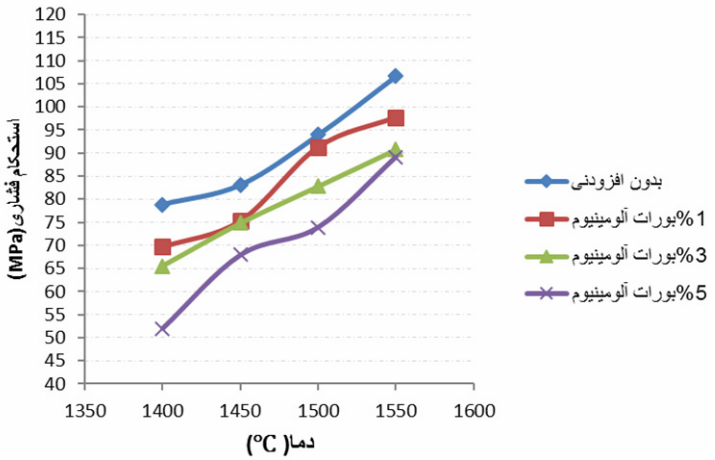
همانطور که مشاهده می‌گردد افزودن بورات آلومینیوم در هر مقداری موجب افت استحکام خمشی و فشاری نسبت به نمونه بدون افزودنی شده است و هرچقدر بورات آلومینیوم بیشتر افزوده شده است افت استحکام بیشتر شده است. بورات آلومینیوم دو رفتار در بدنه‌های کوراندوم-مولایتی دارد. اول اینکه می‌تواند موجب یک مکان رشد ترجیحی برای مولایت‌های در حال سنتز شدن باشد[۱۲]. این موضوع موجب افزایش استحکام بدنه‌ها می‌گردد. از طرف دیگر بورات آلومینیوم (A_9B_2) دارای نقطه ذوب ۱۹۵۰°C است که بالاتر از نقطه ذوب مولایت (۱۸۴۰°C) است. بنابراین در صورت انحلال در مولایت دیرگدازی زمینه را بالاتر می‌برد و موجب افزایش دمای زینتر می‌گردد و رسیدن به استحکام مناسب را مشکل تر می‌کند. چنانچه در شکل ۲ واضح است بین مولایت‌های ۳:۲ و ۲:۱ با برخی از بورات‌های آلومینیوم مثل A_9B_2 محلول جامد وجود دارد. به نظر می‌رسد که در دمای ۱۵۵۰°C و پایین تر از آن، عامل دوم یعنی افزایش دیرگدازی زمینه بر عامل اول یعنی شتاب در ایجاد مولایت غلبه کرده است. در جدول ۲ چگالی بالک، نسبی و درصد تخلخل ظاهری نمونه بدون افزودنی با نمونه حاوی ۵٪

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

افزودنی بورات آلومینیوم مقایسه شده است که نتایج مطابق جدول حاکی از افزایش درصد تخلخل است که نمایشگر دیرگداز شدن نسبی سیستم و انجام عمل زینتر با شدت کمتر در نمونه‌های حاوی افزودنی بورات آلومینیوم است.



شکل ۳- استحکام خمشی نمونه‌های حاوی افزودنی بورات آلومینیوم در مقایسه با نمونه بدون افزودنی پس از پخت در دماهای مختلف



شکل ۴- استحکام فشاری نمونه‌های حاوی افزودنی بورات آلومینیوم در مقایسه با نمونه بدون افزودنی پس از پخت در دماهای مختلف

جدول ۲- چگالی و تخلخل نمونه‌های حاوی ۵٪ درصد وزنی بورات آلومینیوم در مقایسه با نمونه بدون افزودنی پس از پخت در دمای ۱۵۵۰°C به مدت ۳ ساعت

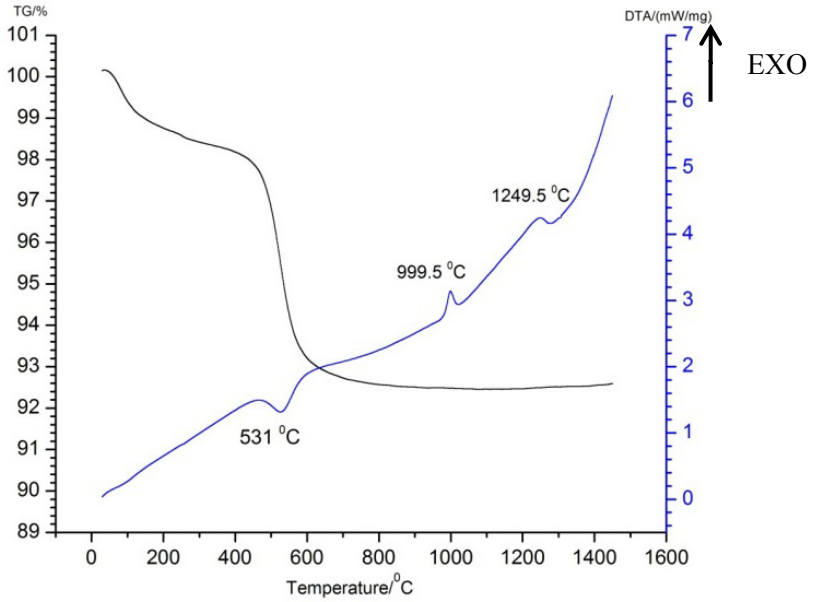
نمونه	چگالی بالک (g/cm^3)	چگالی پیکنومتری (g/cm^3)	چگالی نسبی (٪)	تخلخل ظاهری (٪ حجمی)
بدون افزودنی	۳/۱۲	۳/۵۳	۸۸/۳۸	۱۵/۶۲
حاوی ۵٪وزنی بورات آلومینیوم	۳/۱۸	۳/۶۳	۸۷/۶۰	۱۶/۹۴

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

در شکل ۵ آنالیز حرارتی افتراقی و تغییرات وزنی همزمان (DTA+TGA) زمینه نمونه‌های حاوی ٪۵ بورات آلومینیوم آورده شده است. نتایج نمایشگر پیک‌های گرماگیر خروج هیدروکسیل‌ها از کائولینیت در دمای ۵۳۱°C و تشکیل متاکائولن، تشکیل اسپینل Al-Si در دمای ۹۹۹°C و تشکیل مولایت اولیه در دمای ۱۲۴۹°C است و تقریبا می‌توان گفت که بورات آلومینیوم هیچ تاثیر مهمی بر تبدیلات کائولینیت موجود در مخلوط کامپوزیت آلومینا+ کائولن+ بورات آلومینیوم نداشته است. در حین تبدیل متاکائولن به مولایت اولیه فاز واسطه‌ای تشکیل می‌شود ساختار شبیه ساختار اسپینل‌ها دارد و با فرمول $(Si_4Al_{11.7}B_{4.3})O_{32}$ نشان داده می‌شود که در الگوهای پراش اشعه X الگوی شبیه γ -Al_2O_3 دارد و از طرف دیگر ساختار شبیه مولایت ۲:۱ دارد و به نام اسپینل Al-Si معروف است [۱۵].

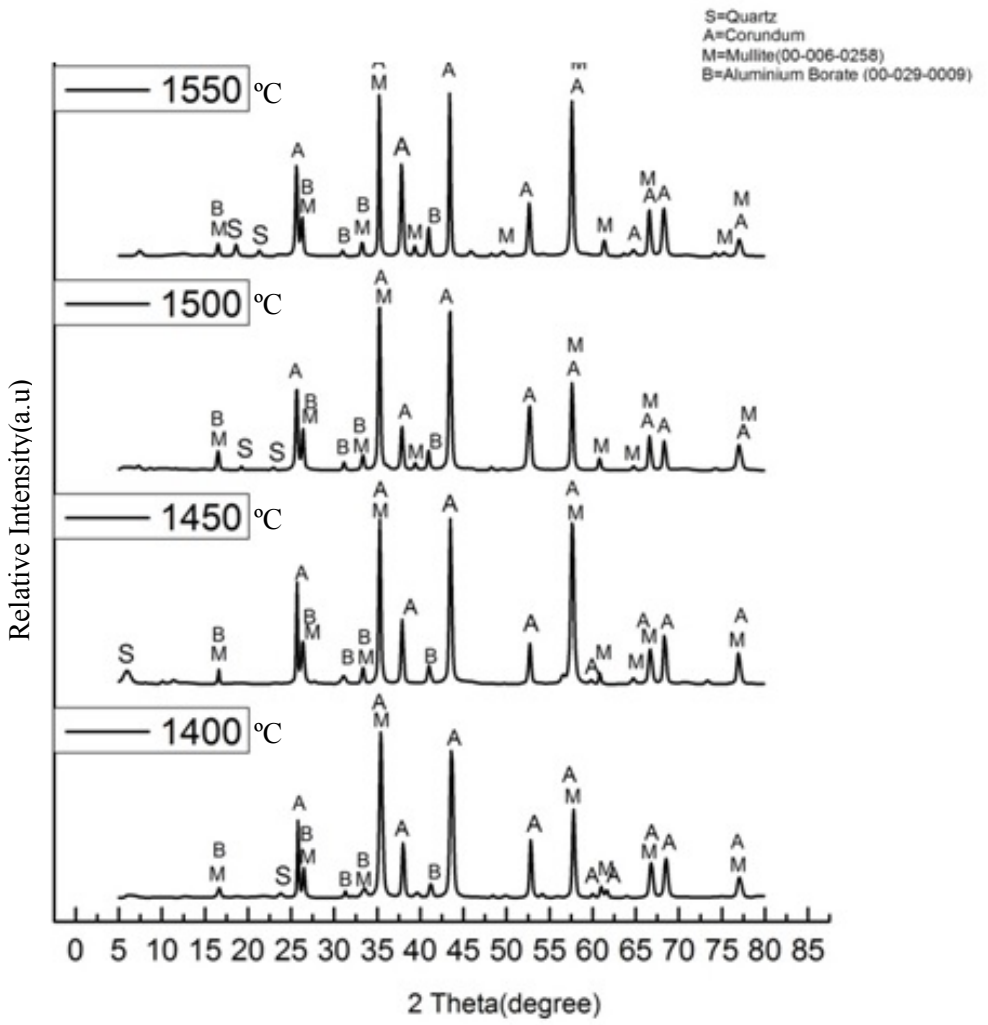
الگوی پراش اشعه X نمونه‌های حاوی افزودنی ٪۵ بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف ۱۴۰۰–۱۵۵۰°C در شکل ۶ آورده شده است. نشان می‌دهد که کوراندوم، مولایت و بورات آلومینیوم بهمراه فاز جزیی کوارتز در تمام دماها حضور دارد.



شکل ۵- آنالیز حرارتی همزمان (DTA+TGA) زمینه نمونه حاوی ٪۵ وزنی افزودنی بورات آلومینیوم

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]



شکل ۶- الگوهای پراش اشعه X نمونه‌های حاوی ۵ درصد وزنی افزودنی بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف

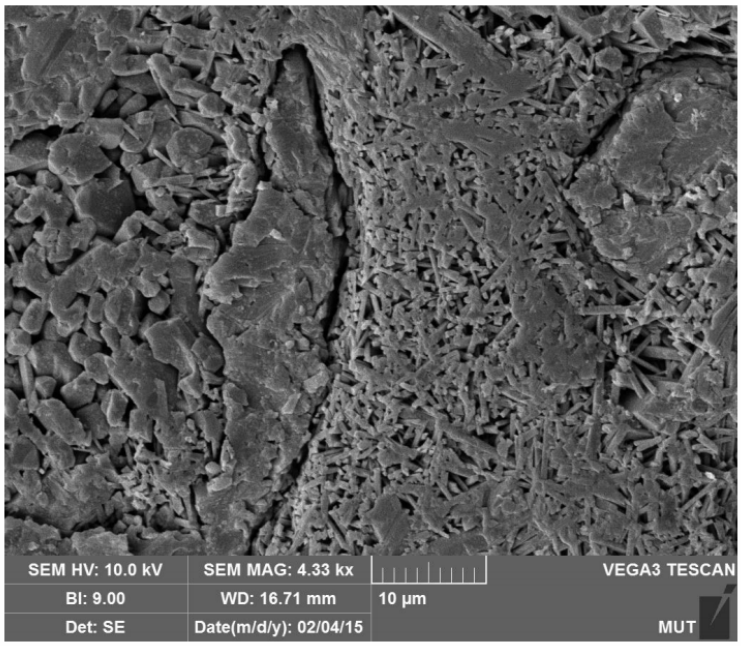
ریزساختار نمونه حاوی بورات آلومینیوم پخت شده در ۱۵۵۰ºC نمایشگر وجود سوزن‌های بسیار زیاد بین آلومیناها است (شکل ۷). سوزن‌های نشان داده شده می‌توانند مولایت، بورات آلومینیوم و محلول جامد آن‌ها باشند.

همانطور که مشاهده گردید بورات آلومینیوم در کامپوزیت‌های کوراندوم-مولایت سنتز شده در این پژوهش عامل کمک زینتر تا حدود ۱۵۵۰ºC نبوده است هرچند که موجب آرایش بهتر مولایت‌ها گردیده است. برای تهیه مولایت‌های سوزنی رشد یافته کنترل شده بورات آلومینیوم بعنوان افزودنی برای تشویق رشد الگودار استفاده شده است. بورات آلومینیوم بدلیل داشتن ساختار مشابه با مولایت در جوانه زنی و رشد الگودار مولایت در دمای ۱۴۵۰ºC نقش مهمی دارد [۱۶و ۱۷].

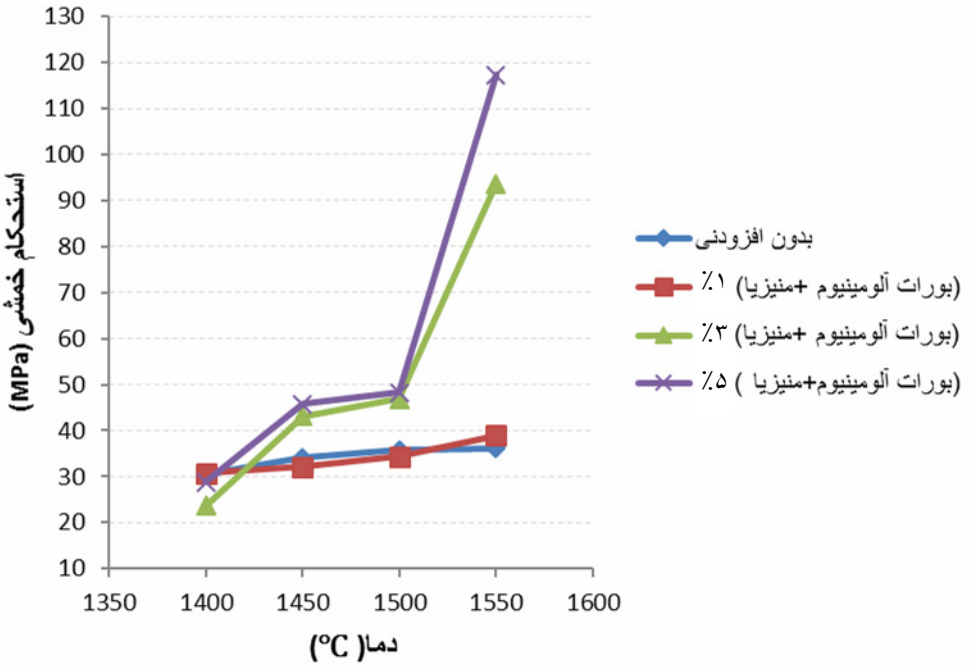
تغییرات استحکام خمشی و فشاری نمونه‌های حاوی درصدهای وزنی مختلف بورات آلومینیوم+ منیزیا پس از پخت در دماهای ۱۴۰۰-۱۵۵۰ºC بمدت ۳ ساعت در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]



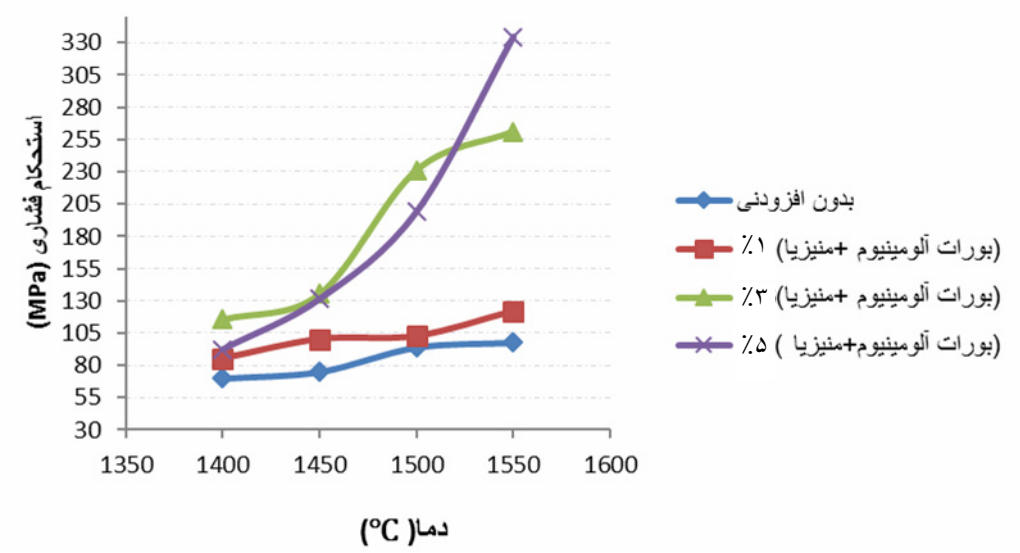
شکل ۷- ریزساختار زمینه حاوی ۵٪ افزودنی بورات آلومینیوم پس از پخت در ۱۵۵۰ °C



شکل ۸- استحکام خمشی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف منیزیا + بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف به مدت سه ساعت

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]



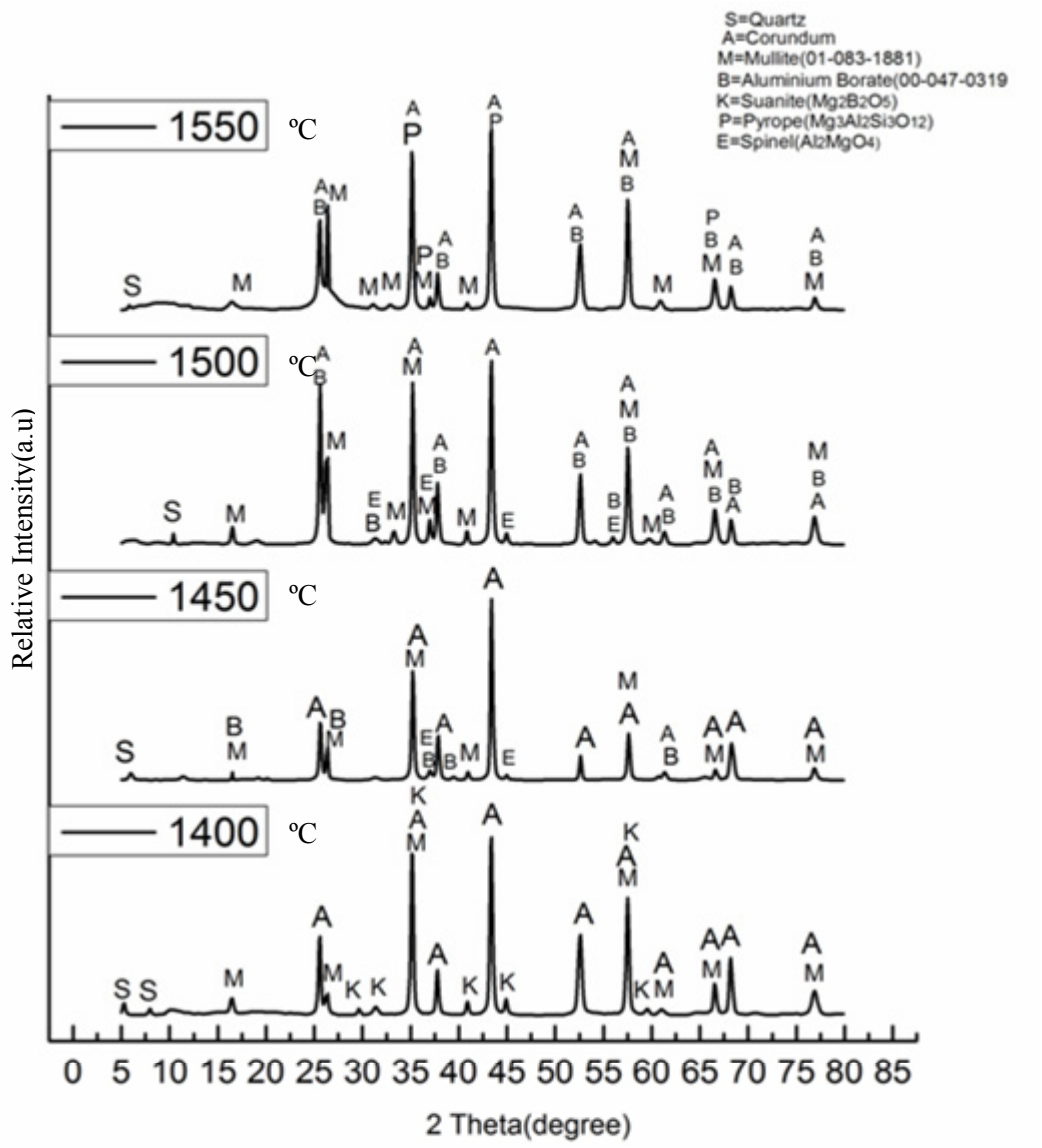
شکل ۹- استحکام فشاری نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف منیزیا + بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف به مدت سه ساعت

نتایج نشان می‌دهند مقادیر استحکام نمونه‌های مجموع یک درصد وزنی افزودنی منیزیا و بورات آلومینیوم، استحکام مشابه با نمونه بدون افزودنی دارد و افزودن میزان مجموع افزودنی به میزان سه و پنج درصد در دمای پخت ۱۴۰۰°C تاثیر مهمی بر خواص استحکام ندارد ولی در دمای پخت ۱۴۵۰°C استحکام نمونه‌های حاوی مجموع ۳ و ۵ درصد افزودنی منیزیا + بورات آلومینیوم نسبت به نمونه بدون افزودنی افزایش می‌یابد و از ۱۵۰۰°C به بعد به ویژه در ۱۵۵۰°C تفاوت آشکاری پیدا می‌کند. همانطور که قبلا ذکر شد بورات آلومینیوم دو نقش را در بدنه‌های کوراندوم-مولایتی بازی می‌کند یکی اینکه می‌تواند موجب ایجاد مولایت‌های جدید با بافت مناسب گردد که با در هم قفل شدگی بر استحکام تاثیر مثبت دارند به ویژه این نقش در حضور افزودنی‌های دیگر که بتوانند مقداری فاز مایع برای انتقال اتم‌های Al و Si و سپس واکنش آن‌ها روی بورات آلومینیوم دارای ساختار مشابه با مولایت ایجاد کنند بیشتر می‌شود. این مواد شامل TiO_2، MgO، Cr_2O_3، قلیایی‌ها و غیره هستند [۱۷و۱۶]. به نظر می‌رسد که در درصدهای بالای بورات آلومینیوم ودر حضور منیزیا این نقش تقویت می‌گردد. در درصدهای پایین به نظر می‌رسد که نقش افزودن بورات آلومینیوم دیرگدازتر از مولایت در کند کردن فرآیند زینتر به نقش مولایت زایی آن غلبه دارد. البته منیزیا می‌تواند به تنهایی بر روی افزایش زینتر مولایت و کوراندوم نیز تاثیر داشته باشد [۱۸ و ۱۹].

به منظور پیگیری تغییرات فازی حین پخت آنالیز پراش اشعه X از نمونه‌های حاوی ۵ درصد مجموع افزودنی منیزیم + بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف بعمل آمد که نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]



شکل ۱۰- الگوهای پراش اشعه X نمونه‌های حاوی ۵٪ افزودنی منیزیا + بورات آلومینیوم پس از پخت در دماهای مختلف به مدت سه ساعت

نتایج نشان می‌دهد که در این حالت پس از پخت در دمای ۱۴۰۰°C، فازهای کوراندوم و مولایت بعنوان فازهای اصلی و فازهای بورات منیزیم $Mg_2B_2O_5$ و احتمالا مقدار جزیی فاز بورات آلومینیوم وجود دارد. احتمال رخ دادن واکنش زیر وجود دارد.

$$9Al_2O_3.2B_2O_3 + 2MgO \rightarrow 2MgO.B_2O_3 + 2Al_2O_3.B_2O_3 + 7Al_2O_3$$

پس از حرارت دادن در دمای ۱۴۵۰°C فاز بورات منیزیم حاصله ازبین رفته است و فازهای کوراندوم ، مولایت و بورات آلومینیوم دیرگداز A_9B_2 و فاز فرعی اسپینل

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

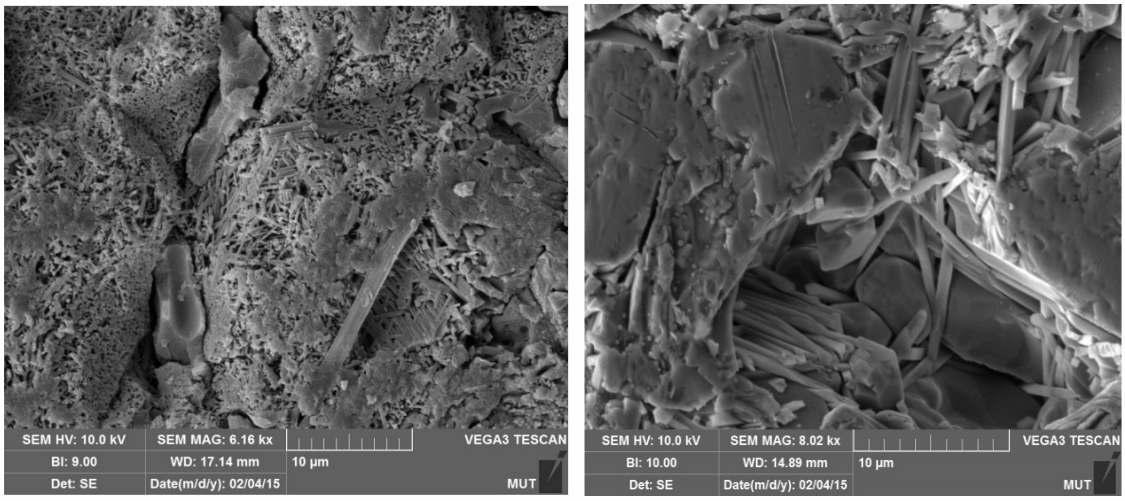
$MgAl_2O_4$ ظاهر شده است. در دمای ۱۵۵۰°C فاز پیروپ ($3MgO.Al_2O_3.3SiO_2$) دارای ساختار مکعبی ظاهر شده است. به نظر می‌رسد که ظهور این فازهای دارای نقطه ذوب پایین تر از بورات آلومینیوم دیرگداز و همچنین درهم تنیده شدن مولایت‌ها باعث افزایش استحکام فشاری سرد می‌گردد.

در جدول ۳ چگالی و تخلخل نمونه‌های پخت شده در ۱۵۵۰°C آورده شده است که نشان می‌دهد چگالی نسبی به ۹۵/۶۸ درصد و تخلخل ظاهری به ۴/۱۶٪ رسیده است که نمایشگر افزایش زینتر نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی و همچنین نسبت به نمونه حاوی افزودنی‌های بورات آلومینیوم است.

در شکل ۱۱ ریزساختار نمونه حاوی دو افزودنی هم زمان بورات آلومینیوم و منیزیا آورده شده است. همانطور که ریزساختار نشان می‌دهد سوزن‌های درشت و طویل به همراه سوزنهای ریز در نمونه وجود دارد. طول متوسط سوزنها به ۷μm و عرض آن‌ها به ۱μm می‌رسد. علاوه بر آن آلومیناهای تبولار و احتمالا آلومینای ریزدانه حاصل از رشد آلومینای گاما نیز وجود دارد. ساختار بشدت درهم تنیده است.

جدول ۳- چگالی و تخلخل نمونه‌های حاوی ۵٪ وزنی مجموع دو افزودنی بورات آلومینیوم + منیزیا پس از پخت در دمای ۱۵۵۰°C به مدت ۳ ساعت

نمونه	چگالی بالک (g/cm^3)	چگالی پیکنومتری (g/cm^3)	چگالی نسبی (٪)	تخلخل ظاهری (٪ حجمی)
بدون افزودنی	۳/۱۲	۳/۵۳	۸۸/۳۸	۱۵/۶۲
۵٪افزودنی(منیزیا+ بورات آلومینیوم)	۳/۴۷	۳/۶۵	۹۵/۶۸	۴/۱۶



ب الف

شکل ۱۱- ریزساختار زمینه حاوی ۵٪ وزنی مجموع افزودنی‌های منیزیا + بورات آلومینیوم پس از پخت در ۱۵۵۰°C به مدت ۳ ساعت

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

۴- نتیجه‌گیری

- با استفاده از نسبت مساوی سوخت به اکسیدان و مواد اولیه نیترات آلومینیوم، اسید بوریک و سوخت گلایسین می‌توان با روش احتراقی به ماده افزودنی بورات آلومینیوم $9Al_2O_3.2B_2O_3$ دست یافت.
- در بدنه‌های حاوی فرمولاسیون پایه ۵۶ درصد وزنی آلومینای تبولار، ۲۰ درصد وزنی آلومینای گاما و ۲۴ درصد وزنی کائولن دیاموند پس از پخت در دماهای ۱۵۵۰°C به چگالی نسبی ۸۸٪ و فازهای اصلی کوراندوم و مولایت می‌توان رسید که استحکام خمشی حوالی ۳۸MPa داشتند.
- با افزودن بورات آلومینیوم به میزان ۵٪ وزنی به فرمولاسیون پایه و پخت در ۱۵۵۰°C، استحکام خمشی به حدود ۳۲MPa و چگالی نسبی به حدود ۸۷٪ افت نمود که نشان از دیرگدازشدن سیستم داشت هرچند که در ریزساختار سوزن‌های مولایت بخوبی تشکیل شده بود.
- با افزودن ۲/۵ درصد بورات آلومینیوم و ۵ /۲ درصد منیزیا به فرمولاسیون پایه پس از پخت در ۱۵۵۰°C، استحکام خمشی به حدود ۱۱۵MPa و چگالی نسبی به حدود ۹۵٪ رسید که نشان از افزایش زینتر داشت. در ریزساختار این بدنه‌ها سوزن‌های طویل و کوتاه درهم تنیده مولایت و احتمالا بورات آلومینیوم وجود داشت و در آنالیز فازی آن علاوه بر فازهای اصلی کوراندوم و مولایت و بورات آلومینیوم، فازهای فرعی بورات منیزیم ($2MgO.B_2O_3$) و آلومینوسیلیکات منیزیم ($3MgO.Al_2O_3.3SiO_2$) نیز وجود داشت.

مراجع

[1] H. Schneider, J. Schreuer, and B. Hildmann, "Structure and properties of mullite—a review," Journal of the European Ceramic Society,Vol 28, pp 329-344, (2008)

[2] O. Burgos-Montes, R. Moreno, C. Baudín "Effect of mullite additions on the fracture mode of alumina" Journal of the European Ceramic Society, Vol 30, pp 857-863, (2010)

[3] C. Aksel" The effect of mullite on the mechanical properties and thermal shock behaviour of alumina-mullite refractory materials" Ceramic International, Vol 29 ,pp 183-188, (2003)

[4] C. Aksel, "The role of fine alumina and mullite particles on the thermomechanical behaviour of alumina–mullite refractory materials," Materials Letters, Vol 57, pp 708-714, (2002)

[5] V. Viswabaskaran, F. Gnanam, and M. Balasubramanian, "Effect of MgO, Y_2O_3 and boehmite additives on the sintering behaviour of mullite formed from kaolinite-reactive alumina," Journal of materials processing technology, Vol 142, pp 275-281, (2003)

[6] C. Y. Chen, G. S. Lan, W. H. Tuan "Preparation of mullite by the reaction sintering of kaolinite and allumina"Journal of the European ceramic society, Vol 20, pp 2519-2525, (2000)

[7] V. Viswabaskanan, F. D Gnanam, M. Balasubramanian " Mullite from clay-reactive alumina for insulating substrate application" Applied clay science, Vol 25, pp 29-35, (2004)

[8] B.-N. Kim, K. Hiraga, K. Morita, H. Yoshida, and Y. Kagawa, "Light scattering in MgO-doped alumina fabricated by spark plasma sintering," Acta Materialia,Vol 58, pp 4527-4535, (2010)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]

[9] L. Kong, T. Zhang, J. Ma, F. Boey, and R. Zhang, "Mullite phase formation in oxide mixtures in the presence of Y_2O_3, La_2O_3,CeO_2" Journal of alloys and compounds,Vol 372, pp 290-299, (2004)
[10] M. Ozdemir, E. Celik, and U. Cocen, "Effect of viscosity on the production of alumina borate nanofibers via electrospinning ," Materiali in tehnologije,*Vol* 47, pp 735-738, (2013)
[11] M. Fisch, T. Armbruster, D. Rentsch, E. Libowitzky, and T. Pettke, "Crystal-chemistry of mullite-type aluminoborates $Al_{18}B_4O_{33}$ and Al_5BO_9: a stoichiometry puzzle," Journal of Solid State Chemistry, Vol 184, pp 70-80, (2011)
[12] H. Luhrs " The influence of boron on the crystal structure and properties of mullite" PhD Thesis, university of Bremen,Germany,(2013)
[13] R. X. Fisoher, H. schneider " crystal chemistry of borates and borosilicates with mullite-type structures:a review" European Journal of Mineralogy,Vol 20(5), pp 917-933, (2008)
[14] I. E. Gonenli, G. L. Messing " Texturing of mullite by templated grain growth with aluminium borate Whiskers" Journal of the European Ceramic Society, Vol 21, pp 2495-2501, (2001)
[15] I. M. Low, P. R. Mopherson "The structure and composition of Al-Si spinel" Journal of materials science letters, Vol 7, pp 1196-1198, (1999)
[16] C. Duran, Y. Kemel. TÜr " templated grain growth of textured mullite/zirconia composites" Materials letters, Vol 59, pp245-249, (2005)
[17] I. Erkin Gönenli and G. L. Messing, "Texturing of mullite by templated grain growth with aluminum borate whiskers," Journal of the European Ceramic Society,Vol 21, pp 2495-2501, (2001)
[18] L. Montanaro, C. Perrot, C. Ensouf, G. Thellet, G. Fantazzi, A. Negro"sintering of industrial mullites in the presence of magnesia as a sintering aid" J.Am.Ceram.Soc, Vol 83[1], pp 189-96, (2000)
[19] M. M. Wash, R. M Khattab, M. Awood"Thermo-machanical propereties of mullite/zirconia reinforced alumina ceramic composites " materials & design,Vol 41, pp 31-36, (2012)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1394.4.4.7.6]