مروری بر اثر فعال‌سازی مکانیکی و افزودنی در تشکیل مولایت در دو دهه گذشته

آرزو سیف‌اله‌زاده، تورج عبادزاده، مسعود علیزاده

پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

seifolahzadeh@yahoo.com

چکیده: *مولایت به عنوان یکی از سرامیک‌های ساختاری و الکترونیکی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد گسترده آن به استحکام مکانیکی خوب، شوک پذیری حرارتی و مقاوت خزشی عالی، هدایت حرارتی کم و پایداری حرارتی در دماهای بالا نسبت داده می‌شود. همچنین ساختار مولایت به گونه‌ای است که درصورتیکه رشد دانه‌های مولایت بدون محدودیت رخ دهد، آنها به صورت آنیزوتروپ رشد می‌کنند. از روش‌های معمول تولید این‌گونه دانه‌ها سنتز بخار- جامد و فرآوری درجا است؛ که به علت معایب این روش‌ها پژوهشگران تلاش نموده‌اند تا با فعال‌سازی مکانیکی مخلوط پودرهای اولیه، تشکیل مولایت را بهبود بخشند. افزودنی‌های اکسیدی نیز دمای تشکیل مولایت را از مخلوط مواد اولیه کاهش می‌دهند. لذا در این مطالعه تلاش می‌شود تا با بررسی اثر فعال‌سازی مکانیکی و افزودنی‌ها به مواد اولیه تشکیل دهنده مولایت، بهبود خواص مولایت ذکر گردد.*

کلمات کلیدی: *فعال‌سازی مکانیکی، مولایت، افزودنی، رشد دانه.*

۱- مروری بر منابع مطالعاتی

مولایت یک فاز سرامیکی مهم است که علاوه بر استفاده در سرامیک‌های سنتی به‌صورت ظروف رومیزی، سرامیک‌های ساختاری و دیرگدازها، در مواد پیش‌رفته دما بالا، جابجاکننده‌های حرارت، فیلترها، ابزار اپتیکی و غیره نیز استفاده می‌شود. همچنین کامپوزیت‌های مولایتی دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در موتور توربین‌های گازی ثابت و هواپیماها هستند [۱].

مولایت و کامپوزیت‌های زمینه مولایتی به علت داشتن خواص مکانیکی عالی در دمای بالا، مقاوت شیمیایی خوب، ضریب انبساط حرارتی و ثابت دی الکتریک پایین، مقاومت خزشی بالا و غیره بسیار مورد توجه می‌باشند [۲]. در بسیاری از موارد از کائولن به عنوان یک ماده کلیدی برای سنتز سرامیک‌های مولایتی استفاده شده است. تشکیل مولایت ازکائولن مستلزم گذراندن یکسری واکنش می‌باشد. در فرآیند گرمایش و در دماهای پایین، کائولن آب پیوند فیزیکی خود را ازدست می‌دهد؛ در دماهای بالاتر به متاکائولن آمورف تجزیه شده و در نهایت به مولایت تبدیل می‌شود [۳,۴].

مولایت با فرمول $3Al_2O_3.2SiO_2$ دارای ساختار کریستالی منحصر به‌فردی است که در آن زنجیره‌هایی با پیوند قوی در امتداد محور c کریستالوگرافی قرار دارند؛ بنابراین دانه‌های آن امکان رشد آنیزوتروپ در یک محیط بدون محدودیت را دارند. درنتیجه الیاف مولایت می‌توانند به راحتی از سنتز بخار- جامد یا فلاکس نمک مذاب تولید شوند. اما تولید با این روش‌ها مقرون به‌صرفه نمی‌باشد؛ زیرا سنتز بخار- جامد نیازمند امکاناتی برای ایجاد خلاء است که هزینه‌بر بوده و از سوی دیگر واکنشی که شامل فازهای گازی باشد، فرآیند را پیچیده می‌کند. سرامیک‌های مولایتی مقاوم همچنین می‌توانند با روش فرآوری درجا تولید شوند. رشد دانه آنیزوتروپ درجا معمولا در دماهای بسیار بالا اتفاق می‌افتد. سرامیک‌های مولایتی ساخته شده به این روش دارای چقرمگی مطلوبی نیستند. چقرمگی شکست کم این سرامیک‌ها به علت رشد بیش از حد دانه، در زمان رشد آنیزوتروپ می‌باشد. بنابراین توسعه روش‌هایی برای تولید الیاف مولایت در دماهای نسبتاً

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

پایین دارای اهمیت زیادی است [۹-۲,۵].

اخیراً kong و همکارانش [۱۰] ثابت کرده‌اند که الیاف مولایت می‌توانند به‌سرعت و در دماهای نسبتاً پایین در مخلوطی از Al_2O_3 و SiO_2 که با فرآیند آسیاب پرانرژی فعال شده‌اند (آلیاژسازی مکانیکی)، ایجاد شوند؛ چگالی ابزار خردایش، نوع مواد اولیه و زمان آسیاب در اندازه الیاف و دمای تبدیل به مولایت بسیار مؤثر است.

پژوهشگران [۱۳-۱۱] تشکیل مولایت در زینتر واکنشی جفت آلومینا و کوارتز را با مکانیزم انحلال- رسوب این‌گونه توضیح دادند. ابتدا در دمای خاصی یک فاز مایع غنی از SiO_2 تشکیل و سپس Al_2O_3 در فاز مایع حل می‌شود؛ با رسیدن غلظت Al_2O_3 به مقدار بحرانی، جوانه‌زنی مولایت رخ می‌دهد. بر طبق دیاگرام فاز Al_2O_3–SiO_2 فاز مایع در ترکیب غنی از SiO_2 در دمای بالای دمای یوتکتیک ($1590 \pm 10^{\circ}C$) تشکیل می‌شود. ولی به علت کاهش بسیار زیاد اندازه ذرات مواد اولیه در مخلوط‌های اکسیدی که با آسیاب پر انرژی آسیاب می‌شوند، فاز مایع در دماهای پایین‌تر تشکیل شده و سرعت انحلال Al_2O_3 در فاز مایع بیشتر می‌شود (سرعت انحلال Al_2O_3 وابسته به ویسکوزیته فاز مایع و اندازه ذرات Al_2O_3 است) که این دو عامل باعث کاهش دمای مولایتی شدن می‌شوند. علاوه بر آسیاب پرانرژی، افزودنی‌های اکسیدی نیز ویسکوزیته شیشه را کاهش داده و تحرک اجزا نفوذکننده را بیشتر می‌کنند.

با توجه به اینکه آسیاب پرانرژی مواد اولیه اثر بسزایی روی دمای تشکیل فاز مولایت و ابعاد دانه‌های مولایت داشته و اینکه افزودنی‌های اکسیدی دمای تشکیل فاز مولایت را از مخلوط Al_2O_3 و SiO_2 کاهش می‌دهند [۱۴,۱۵]، در این گزارش چگونگی بهبود خواص مولایت در اثر آسیاب پرانرژی و افزودنی بررسی شد؛ به عبارتی کاهش دمای تشکیل و دانه‌بندی مواد اولیه اکسیدی تشکیل‌دهنده مولایت به همراه افزودنی‌های B_2O_3، CuO، WO_3، TiO_2 و اکسیدهای واسطه که فعال‌سازی مکانیکی شدند، بررسی شد.

۱-۱-فعال‌سازی مکانیکی

فعال‌سازی مکانیکی یک روش آسیاب پرانرژی است که در آن از انواع مختلفی آسیاب استفاده می‌شود. طی این فرآیند مخلوطی از پودرهای مختلف تحت نیروهای فشاری بسیار قوی قرار گرفته و امکان ایجاد آلیاژها با شکست و جوش سرد مکرر ذرات پودری که معمولاً قابل مخلوط شدن هستند، وجود دارد.

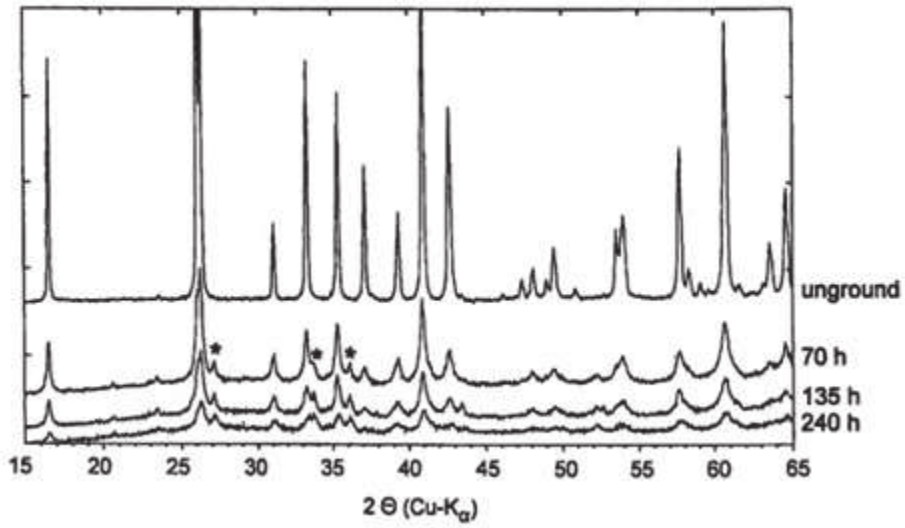
این روش معمولاً برای تولید پودرهای فلزی ترکیبی با ریزساختار کنترل شده و ریز و همچنین آلیاژهایی که تولید آنها به روش‌های ذوب و ریخته گری معمول، سخت و یا غیر ممکن است، بکار می‌رود. همچنین به دلیل سادگی این روش در تولید مواد نانوبلوری در دمای اتاق، اخیراً برای سنتز مواد سرامیکی نیز از آن استفاده شده است [۱۶,۱۷].

۱-۱-۱- فعال‌سازی مکانیکی مولایت

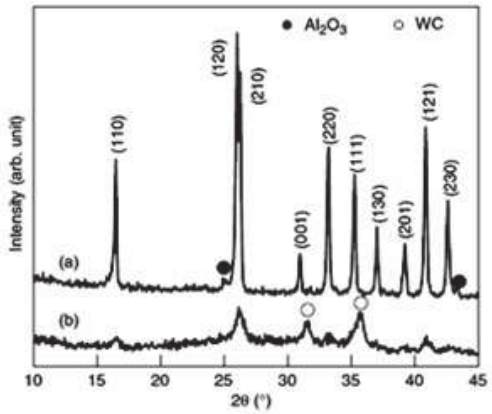
مطالعات زیادی در مورد فعال‌سازی مکانیکی مولایت انجام شده است. Schmücker و همکارانش [۱۸] پودر فیوز مولایت را به عنوان ماده اولیه کریستالی در زمان‌های ۷۰، ۱۳۵ و ۲۴۰ ساعت با محفظه و گلوله‌هایی از جنس نیترید سیلیکون با نسبت گلوله به پودر ۱:۱ در محیط ایزوپروپیل الکل آسیاب پرانرژی کردند. در شکل ۱ الگوهای اشعه X پودرهای آسیاب شده در زمان‌های مختلف آورده شده است که علاوه بر کاهش اندازه ذرات، یک فرآیند آمورفی‌شدن را نیز نشان می‌دهد.

در تحقیق دیگری [۲] پودر مولایت تجاری با محفظه و گلوله‌های کاربید تنگستن با نسبت گلوله به پودر ۴۰/۱ به مدت ۱۰ ساعت، با سرعت ۲۰۰ rpm آسیاب سیاره‌ای شد. بعد از آسیاب، پیک‌های پراش شدیداً کوتاه و پهن شدند که علت آن ریزشدن و یا حتی آمورفی‌شدن ذرات مولایت در اثر آسیاب پر انرژی بیان شد (شکل ۲).

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]



شکل ۱- الگوهای اشعه X مولایت آسیاب‌نشده و مولایت آسیاب‌شده در زمان‌های ۷۰، ۱۳۵ و ۲۴۰ ساعت [۱۸].



شکل ۲-الگوهای پراش اشعه X پودر مولایت (a) قبل و(b) بعد از ۱۰ ساعت آسیاب پر انرژی [۲].

نتایج نشان می‌دهند که چگالی بیشتر ابزار آسیاب و نیز بالاتر بودن نسبت گلوله به پودر، اثر قابل ملاحظه‌ای در رسیدن به نتایج مشابه در زمان‌های بسیار کمتر آسیاب دارد [۲,۱۸].

۱-۱-۲- اثر فعال‌سازی مکانیکی در تشکیل مولایت

پژوهشگران نشان داده‌اند که می‌توان بسادگی الیاف مولایت را از فعال‌سازی مکانیکی مخلوط Al_2O_3 و SiO_2 تهیه کرد. ایجاد این الیاف به علت واکنش‌پذیری بالای اجزای اکسیدی بوده که در اثر آسیاب پرانرژی بدست می‌آید [۱۰]. همچنین به دلیل ساختار آنیزوتروپ مولایت، دانه‌های آن تمایل دارند در همان زمانی که مولایت در محیط بدون محدودیت (قبل از تراکم) تشکیل می‌شود، به صورت آنیزوتروپ رشد کنند در صورتیکه در واکنش‌های حالت جامد معمولی تراکم قبل از تشکیل مولایت انجام شده و امکان رشد دانه‌ها به صورت آنیزوتروپ وجود ندارد. به علت ایجاد اینگونه دانه‌ها بدنه‌های مولایتی تشکیل شده با این روش دارای چگالی بسیار کمی (٪۷۰ چگالی تئوری) هستند [۱۱,۱۲].

۱-۱-۳- ایجاد مولایت کامپوزیت ساختاری با آسیاب پرانرژی

باتوجه به اینکه سرامیک‌های مولایتی با دانه‌های هم‌محور دارای چقرمگی شکست نسبتاً کم هستند، در کاربردهای عملی از سرامیک‌های مولایتی مقاوم که با افزودن الیاف مولایت به زمینه مولایت تک محوری ایجاد می‌شوند، استفاده می‌شود. ورود این الیاف فرآیند را پیچیده کرده و برای جلوگیری از شکست آنها، مراقبت و کنترل زیادی باید صورت گیرد. روش دیگر تولید سرامیک‌های مولایتی مقاوم، رشد دانه آنیزوتروپ

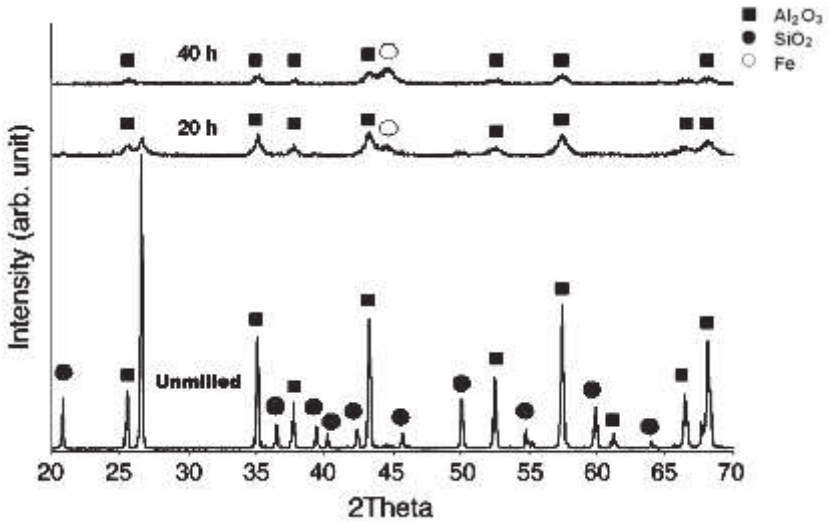
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

درجا می‌باشد که در مقایسه با روش قبل بسیار ساده‌تر است ولی به علت دمای بسیار زیاد برای القا رشد دانه آنیزوتروپ به زمینه مولایت تک محوری، رشد غیر عادی دانه مولایت صورت گرفته و چقرمگی شکست مطوب بدست نمی‌آید.

Kong و همکارانش [۱۹] سرامیک‌های مولایتی با ساختارهای آنیزوتروپ درجا که شامل مولایت با دانه‌های معمولی و الیاف مولایت بود، را تولید کردند. آنها برای این کار مواد اولیه اکسیدی آسیاب شده و مواد اولیه آسیاب نشده را با نسبت‌های وزنی ۲۵/۷۵، ۵۰/۵۰ و ۷۵/۲۵ مخلوط کردند. پودرهای آسیاب‌نشده منبعی برای دانه‌های مولایت هم‌محور هستند درحالیکه پودرهای آسیاب‌شده منجر به ایجاد دانه‌های مولایت آنیزوتروپ می‌شوند. رفتار خوب مولایتی‌شدن با مکانیزم جوانه‌زنی توجیه می‌شود؛ کریستال‌های مولایت تشکیل شده از پودر آسیاب شده در دمای پایین به عنوان جوانه عمل کرده و دمای مولایتی‌شدن پودر آسیاب‌نشده را کاهش می‌دهند. با افزایش نسبت پودر آسیاب‌شده به پودر آسیاب نشده، مولایتی شدن در دمای پایین‌تری اتفاق می‌افتد.

۱-۱-٤- تشکیل مولایت نانوساختار در اثر فعال‌سازی مکانیکی

بهمنش و همکارانش [۱۲] مولایت با ساختار نانو را از پخت مواد اولیه اکسیدی (Al_2O_3 و SiO_2) که در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ ساعت با نسبت گلوله به پودر ۲۰/۱ و با سرعت چرخش ۳۰۰rpm آسیاب پرانرژی شدند، بدست آوردند. درالگوی اشعه X پودرهای آسیاب‌شده (شکل ۳) SiO_2 دیده نمی‌شود که علت آن ساختار آمورف SiO_2 است. با افزایش زمان آسیاب، پیک‌های Al_2O_3 در مقایسه با این پیک‌ها در نمونه آسیاب‌نشده به طور قابل توجهی پهن شدند که بیان‌کننده کاهش اندازه کریستالیت‌ها به ابعاد نانومتری و تجمع میکروکرنش‌ها در شبکه است. الگوهای اشعه X نمونه‌های پخته شده در ۱۴۵۰°C فاز غالب مولایت را در نمونه‌ها نشان می‌دهند.



شکل ۳- الگوهای اشعه X نمونه‌های آسیاب‌شده در آسیاب سیاره‌ای [۱۲].

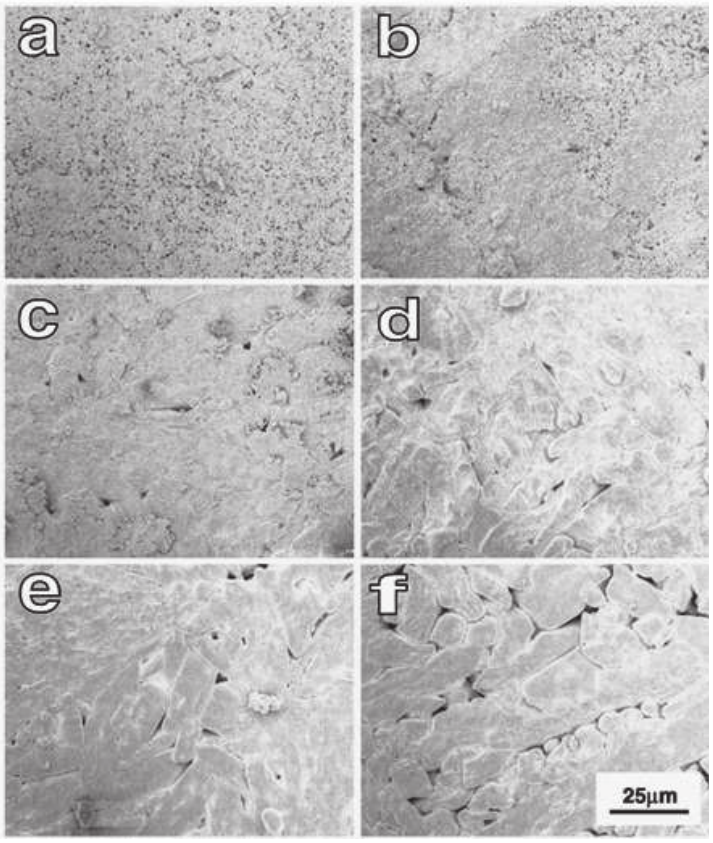
۱-۲-فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه تشکیل دهنده مولایت و CuO

در تحقیقی که توسط Kong و همکارانش [۲۰] صورت گرفت، اکسیدهای اولیه Al_2O_3 و SiO_2 با ۲٪ وزنی CuO به مدت ۵ ساعت با محفظه و گلوله‌های فولاد ضد زنگ و کاربید تنگستن با نسبت گلوله به پودر ۴۰/۱، آسیاب پرانرژی شدند. سپس نمونه‌ها به شکل قرص پرس شده و در دماهای بین ۱۰۰۰-۱۵۰۰ °C پخته شدند.

نتایج نشان می‌دهند که در کلیه نمونه‌های آسیاب شده، تشکیل مولایت در دمای ۱۲۰۰ °C کامل می‌شود

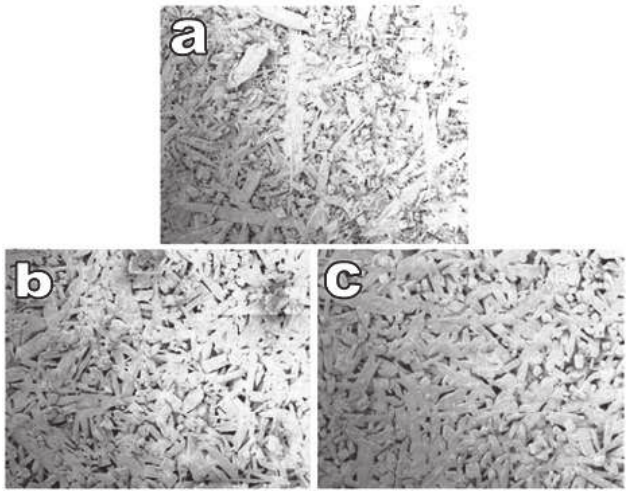
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

که این دما بسیار کمتر از دمایی است که برای همان نمونه‌ها و بدون آسیاب پرانرژی لازم می‌باشد. در تصاویر SEM مربوط به پودرهای آسیاب شده با فولاد ضد زنگ و پخته شده در دماهای مختلف، تا دمای ۱۳۰۰°C رشد دانه آنیزوتروپ دیده نمی‌شود. با افزایش دمای پخت، هم ابعاد و هم آنیزوتروپی دانه‌ها بیشتر می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴- تصاویر SEM نمونه‌های آسیاب شده با فولاد ضد زنگ و پخته شده در دمای ۱۰۰۰ °C (a) ۱۱۰۰ °C (b) ۱۲۰۰ °C (c) ۱۳۰۰ °C (d) ۱۴۰۰ °C (e) ۱۵۰۰ °C (f) [۲۰].

برخلاف نمونه‌های آسیاب شده با فولاد ضد زنگ، الیاف مولایت در پودرهای آسیاب شده با کاربید تنگستن (شکل ۵) تشکیل شده و در ۱۲۰۰ °C همه دانه‌ها تبدیل به الیاف می‌شوند اما با بالارفتن دمای پخت ابعاد این الیاف ثابت می‌ماند [۲۰].



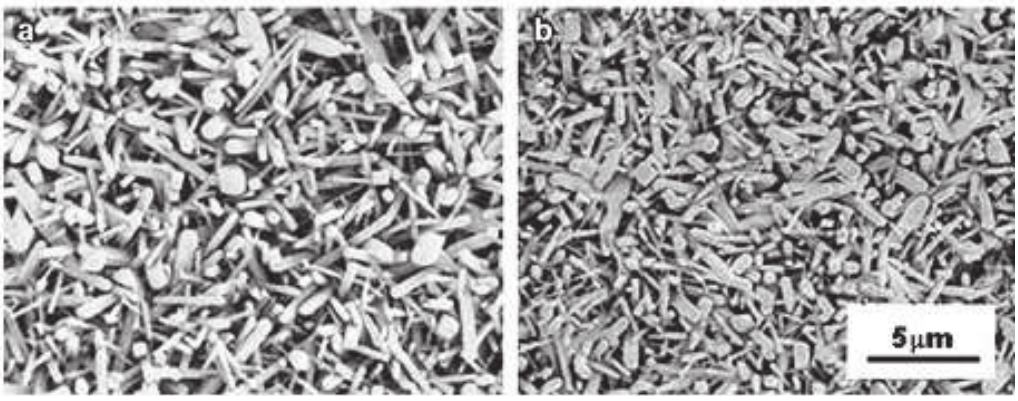
شکل ۵- تصاویر SEM نمونه‌های آسیاب شده با کاربید تنگستن و پخته شده در دماهای ۱۱۰۰ °C (a) ۱۲۰۰ °C (b) ۱۳۰۰ °C (c) [۲۰].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

۱-۳-فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه تشکیل دهنده مولایت و B_2O_3

باتوجه به اینکه سازکار تشکیل فاز مولایت با واکنش انحلال- رسوب کنترل می‌شود و در بین اکسیدهای مختلف مؤثرترین اکسید B2O3 می‌باشد، در پژوهشی [۲۱] اکسیدهای اولیه و مقادیر مختلفی B_2O_3 (تا ٪۲۰ مولی) به مدت ۴ ساعت با محفظه‌ها و گلوله‌های فولاد ضد زنگ و کاربید تنگستن با نسبت گلوله به پودر به ترتیب $^{۲۰}/_{۱}$ و $^{۴۰}/_{۱}$، آسیاب پرانرژی شده و به صورت قرص‌هایی تهیه و در دماهای بین °C ۱۵۰۰-۱۰۰۰ پخته شدند. نتایج نشان می‌دهند که دمای تشکیل مولایت در مخلوط پودرهای اولیه و B_2O_3 بدون آسیاب پرانرژی کمتر از این دما برای مخلوط مواد اولیه بدون B_2O_3 و بدون آسیاب پرانرژی است که به نقطه ذوب پایین B_2O_3 و کمک به تشکیل فاز مایع غنی از SiO_2 و بهبود واکنش Al_2O_3 در SiO_2 نسبت داده می‌شود. دمای تشکیل مولایت در مخلوط آسیاب شده با کاربید تنگستن کمتر از این دما در مخلوط آسیاب شده با فولاد ضد زنگ است. مقادیر بالای B_2O_3 باعث ایجاد الیاف کوچکتر با توزیع اندازه یکنواخت‌تر می‌شود (شکل ۶).

برخلاف ترکیبات آسیاب‌شده با فولاد ضد زنگ، در پودرهای آسیاب‌شده با کاربید تنگستن و پخته‌شده در دماهای مختلف، الیاف مولایت با شکل‌های منظم تشکیل شده و با افزایش دمای پخت ابعاد الیاف زیاد می‌شود.

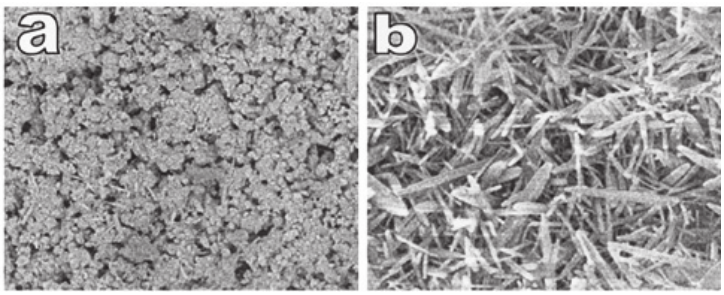


شکل ۶- تصویر SEM نمونه آسیاب‌شده با کاربید تنگستن و پخته شده در °C ۱۴۰۰ با (a) ٪۵ مولی و (b) ٪۲۰ مولی B_2O_3 [۲۱].

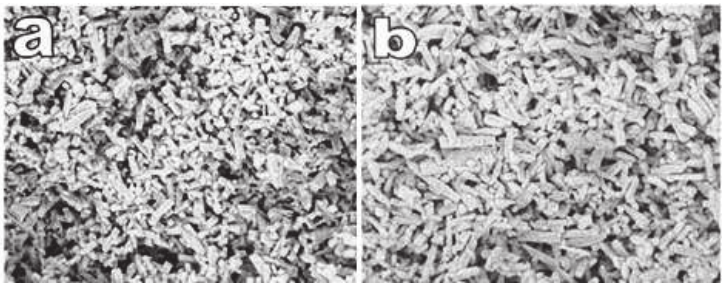
۱-٤-فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه تشکیل دهنده مولایت و WO_3

در پژوهش صورت گرفته [۱۱] نشان داده شد که فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه و WO_3 (تا ٪۲۰ مولی) با آسیاب سیاره‌ای به مدت ۵ ساعت، در محفظه و گلوله‌هایی از جنس کاربید تنگستن و با نسبت گلوله به پودر $^{۴۰}/_{۱}$ اثر بسزایی بر دمای تشکیل مولایت و نیز مورفولوژی دانه‌های مولایت دارد. در نمونه‌های با مقادیر مختلف WO_3، مولایتی شدن در دمای °C ۱۱۰۰ کامل شده و دانه‌های مولایت از ابتدا به صورت الیاف منظم و با ویژگی‌های تک کریستال ظاهر می‌شوند. همانطور که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، افزودن اکسیدهایی مانند WO_3 می‌تواند باعث کاهش ویسکوزیته فاز مایع شده که کاهش ویسکوزیته فاز مایع به تشکیل مولایت کمک می‌کند. تصور می‌شود که WO_3 به عنوان مراکز هتروژن جوانه‌زنی عمل کرده و باعث ایجاد جوانه مولایت در دمای پایین‌تر می‌شود. افزودن مقدار بیشتر WO_3، موجب بیشتر شدن مراکز جوانه‌زنی و کاهش دمای تشکیل مولایت می‌شود. علت کوتاه شدن اندازه الیاف در مقادیر زیاد WO_3، تعداد زیاد مراکز جوانه‌زنی است (شکل‌های۷ و ۸).

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]



شکل ۷- تصویر SEM نمونه دارای ٪۵ مولی WO_3پخته شده در دمای: (a) ۱۰۰۰°C (b) ۱۱۰۰°C [۱۱].

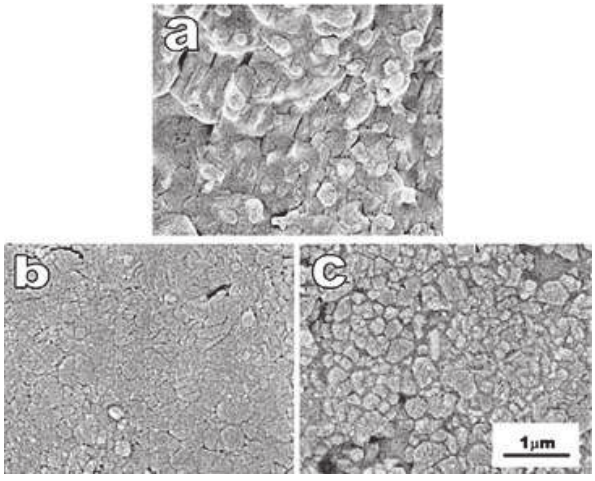


شکل ۸- تصویر SEM نمونه دارای ٪۲۰ مولی WO_3 پخته‌شده در دمای: (a) ۱۰۰۰ °C (b) ۱۱۰۰ °C [۱۱].

۱-۵-فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه تشکیل‌دهنده مولایت و اکسید فلزات واسطه

در پژوهش دیگری که توسط Kong و همکارانش [۱۳] صورت گرفت، اکسیدهای اولیه (Al_2O_3 و SiO_2) به صورت جداگانه با مقادیر یکسان Fe_2O_3، CoO و NiO به مدت ۵ ساعت با محفظه و گلوله‌های فولاد ضدزنگ با نسبت گلوله به پودر ۱/۲۰ آسیاب پرانرژی شدند. نمونه‌ها به شکل قرص‌هایی تهیه شده و در دماهای بین °C ۱۴۰۰-۱۰۰۰ پخته شدند. الگوهای پراش اشعه X نشان داد که آسیاب پرانرژی این اکسیدها با مخلوط مواد اولیه اثر مشابهی در تشکیل مولایت دارند و در هر سه مورد، دمای تشکیل مولایت °C ۱۲۰۰ گزارش شد که کمتر از آن دما در فرآیند حالت جامد معمولی است. تصاویر SEM نمونه‌های دارای افزودنی و آسیاب‌شده که در دماهای مختلف پخته شدند، نشان می‌دهد که در بالای دمای °C ۱۲۰۰ و همزمان با تشکیل مولایت، دانه‌ها به صورت آنیزوتروپ رشد می‌کنند؛ درصورتیکه در زیر این دما دانه‌ها هم‌محور هستند. حداکثر چگالی این بدنه‌ها قبل از تشکیل فاز مولایت است.

تصاویر SEM نمونه‌های دارای افزودنی، که آسیاب پرانرژی نشدند (شکل۹)، نشان می‌دهند که علت رشد دانه آنیزوتروپ، افزودن اکسیدهای فلزی نیست؛ بلکه آسیاب پرانرژی باعث ایجاد این‌گونه دانه‌ها شده است [۱۳].

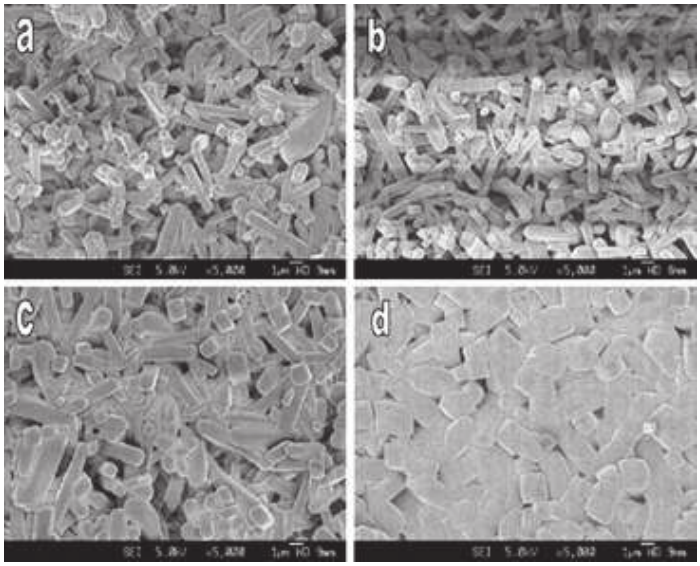


شکل ۹- تصاویر SEM مخلوط‌های آسیاب نشده و پخته شده در °C ۱۴۰۰: (a) Fe_2O_3 (b) CoO (C) NiO[۱۳].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

۱-۶-فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه تشکیل‌دهنده مولایت و TiO_2

محققین [۵] اکسیدهای اولیه Al_2O_3 و SiO_2 با ۱ تا ۱۰ درصد وزنی TiO_2 به مدت ۵ ساعت در آسیاب سیاره‌ای، با محفظه و گلوله‌های کاربید تنگستن و با نسبت گلوله به پودر ۱/۴۰ آسیاب پرانرژی کردند و پودرهای بدست آمده را به شکل قرص پرس کرده و در دماهای بین $^{\circ}C$ ۱۵۰۰-۱۱۰۰ حرارت دادند. با توجه به الگوهای پراش اشعه X، افزودن ۱ درصد وزنی TiO_2 بیشترین تأثیر را بر تشکیل مولایت دارد؛ که به نظر می‌رسد با افزودن مقدار بیشتر TiO_2، از ترکیب Al_2O_3 و SiO_2 برای تشکیل مولایت جلوگیری شود. همچنین چگالی نمونه‌ها با افزایش غلظت TiO_2بیشتر می‌شود. تصاویر SEM نمونه‌های دارای مقادیر مختلف TiO_2پخته‌شده در $^{\circ}C$ ۱۵۰۰ در شکل ۱۰ آورده شده است. نمونه بدون افزودنی دارای دانه‌های سوزنی بوده و با افزودن ۱ درصد وزنی TiO_2 ابعاد دانه‌ها بیشتر می‌شود. دانه‌ها در نمونه با ۳ درصد وزنی TiO_2 نامنظم بوده و ابعاد آنها بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۰-تصاویر SEM نمونه‌های بدست آمده از پودرهای آسیاب‌شده پخته‌شده در $^{\circ}C$ ۱۵۰۰ به مدت ۵ ساعت: (a) بدون TiO_2 (b) دارای ۱ درصد وزنی TiO_2 (c) دارای 3 درصد وزنی TiO_2 (d) دارای 5 درصد وزنی TiO_2 [۵].

۲- نتیجه‌گیری

باتوجه به مطالعات مختلف، الیاف‌های مولایت می‌توانند از مخلوط ترکیبات اکسیدی با آسیاب پرانرژی بدست آیند. آسیاب مواد اولیه به صورت قابل توجهی دمای تشکیل مولایت را کاهش می‌دهد. ابزار آسیاب با چگالی بالا (مانند کاربید تنگستن) برای ایجاد الیافی با کیفیت بالا ضروری است. آسیاب پرانرژی مخلوط اکسیدهای اولیه و CuO باعث کاهش دمای تشکیل مولایت می‌شود. افزودن B_2O_3 به ترکیبات اکسیدی اولیه و آسیاب پرانرژی آنها باعث بهبود رفتار مولایتی شدن مخلوط Al_2O_3 و SiO_2 می‌شود. فعال‌سازی مکانیکی مخلوط اکسیدهای اولیه و WO_3 به تشکیل فاز مولایت کمک کرده و با افزایش مقدار افزودنی دمای تشکیل مولایت کاهش می‌یابد ولی اندازه الیاف کم می‌شود. افزودن اکسیدهای فلزی Ni، Co و Fe به همراه آسیاب پرانرژی، موجب تشکیل سرامیک مولایتی متراکم با ریزساختار آنیزوتروپ می‌شود. واکنش Al_2O_3 و SiO_2 با افزودن مقادیر مناسب TiO_2 و فعال‌سازی مخلوط، بیشتر شده و رشد دانه آنیزوتروپ در این ترکیب مشاهده شد.

مراجع

1. P. M. Souto, R. R. Menezes, R. H. G. A. Kiminami, "Sintering of Commercial Mulite Powder: Effectof MgO Dopant", J. Mater. Process. Technol. 209, pp 548-553 (2009).

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]

2. L. B. Kong, T. S. Zhang, J. Ma, F. Y. C. Boey, "Anisotropic Grain Growth in Mullite Powders as a Result of High-energy Ball Milling", J. Am. Ceram. Soc. 90, pp 4058-4055 (2007).
3. T. Ebadzadeh, "Effect of Mechanical Activation and Microwave Heating on Synthesis and Sintering of Nano-Structured Mullite", J.Alloy Compos. 489, pp 125-129 (2010).
4. H. Schneider, J. Schreuer, B. Hildmann, "Structure and Properties of Mullite—A Review", J. Eur. Ceram.Soc. 28, pp 329-344 (2008).
5. T. S. Zhang, L. B. Kong, Z. H. Du, J. Mac, S. Li, "Tailoring the Microstructure of Mechanoactivated Al2O3 and SiO2 Mixtures with TiO2 Addition", J. Alloys Compds. 506, pp 777-783 (2010).
6. S. H. Hong, W. Cermignani, G. L. Messing, "Anisotropic Grain Growth in Seeded and B2O3-Doped Diphasic Mullite Gels", J.Eur.Ceram.Soc. 16, pp 133-141 (1996).
7. W. Yoon, P. Sarin, W. M. Kriven, "Growth of Textured Mullite Fibers Using a Quadrupole Lamp Furnace", J.Eur.Ceram.Soc. 28, pp 455-463 (2008).
8. I. Regiani, W. L. E. Magalhães, D. P. F. de Souza, C. O. Paiva-Santos, M.F. de Souza, "Nucleation and Growth of Mullite Whiskers from Lanthanum- Doped Aluminosilicate Melts", J. Am. Ceram. Soc. 85, pp 232-238 (2002).
9. M. D. Sacks, N. Bozkurt, G. W. Scheiffele, "Fabrication of Mullite- Matrix Composites by Transient Viscous Sintering of Composite Powdersk", J. Am. Ceram. Soc. 74, pp 2428-2437 (1991).
10. L. B. Kong, J. Ma, H. Huang, "Mullite Whiskers Derived from Oxide Mixture Activated by A Mechanochemical Process", Adv. Eng. Mater. 4, pp 490-494 (2002).
11. L. B. Kong, H. Huang, T. S. Zhang, J. Mab, F. Boey, R. F. Zhang, Z. H. Wang, "Growth of Mullite Whiskers in Mechanochemically Activated Oxides Doped with WO3", J. Eur. Ceram. Soc. 23, pp 2257-2264 (2003).
12. N. Behmanesh, S. Heshmati-Manesh, A. Ataie, "Role of Mechanical Activation of Precursors in Solid State Processing of Nano-Structured Mullite Phase", J. Alloys Compds. 450, pp 421-425 (2008)
13. L. B. Kong, T. S. Zhang, J. Mab, F. Boey, "Anisotropic Grain Growth of Mullite in High-Energy Ball Milled Powders Doped with Transition Metal Oxides", J. Eur .Ceram.Soc. 23, pp 2247-2256 (2003).
14. C. Baudin, M. I. Osendi, J. S. Moya, "Solid Solution of TiO2 in Mullite", J. Mater. Sci. Lett. 2, pp 185-187 (1983).
15. S. H. Hong, G. L. Messing, "Mullite Transformation Kinetics in P2O5-, TiO2-, and B2O3-Dopped Aluminosilicate Gels", J. Am. Ceram. Soc. 80, pp 1551-1559 (1997).
16. P. S. Gilman, J. S. Benjamin, "Mechanical Alloying", Annual Review of Materials Science, 13, pp. 279-300, (1983).
17. Duygu A˘gao˘gulları, Hasan Gökc¸e, ˙Ismail Duman, M. LütfiÖvec¸o˘glu, "Characterization Investigations of ZrB2/ZrC Ceramic Powders Synthesized by Mechanical Alloying of Elemental Zr, B and C Blends", J. Eur. Ceram. Soc. xxx, pp xxx–xxx (2011).
18. M. Schmücker, H. Schneider, K. J. D. MacKenzie, "Mechanical Amorphization of Mullite and Thermal Recrystallization", J. Non-Cryst. Solids. 226, pp 99-104 (1998).
19. L. B. Kong, T. S. Zhang, Y. Z. Chenb, J. Mab, F. Boey, H. Huang, "Microstructural Composite Mullite Derived from Oxides via a High-Energy Ball Milling Process" ,Ceram. Int. 30, pp 1313-1317 (2004).
20. L. B. Kong, J. Ma, H. Huang, T. S. Zhang, F. Boey, "Anisotropic Mullitization in CuO-Doped Oxide Mixture Activated by High-Energy Ball Milling", Mater. Lett. 57, pp 3660-3666 (2003).
21. L. B. Kong , T. S. Zhang, J. Mac, F. Y. C. Boey, "Mullitization Behavior and Microstructural Development of B2O3–Al2O3–SiO2 Mixtures Activated by High-Energy Ball Milling", Solid State Sciences. 11, pp 133-1342 (2009).

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-06]