فصلنامه‌ی زمین شناسی کاربردی
سال ۳(۱۳۸۶)، شماره ۲ : ۱۰۹-۱۰۴
WWW.appliedgeology.ir

کاربرد آندالوزیت همدان برای ساخت بدنه‌های کوردیریت-مولایت

سیّد حسین بدیعی[۱]، ساسان اطرج[۲]
۱) گروه مهندسی مواد-سرامیک، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد
۲) گروه مهندسی مواد-سرامیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهرکرد sasan.otroj@gmail.com

چکیده

در این تحقیق، آندالوزیت همدان و دیگر موادّ اوّلیّه‌ی داخلی همانند تالک، کائولن، آلومینای کلسینه شده و اکسید منیزیم برای ساخت بدنه‌های دیرگداز کوردیریت-مولایت مورد استفاده قرار گرفته است. به این منظور فرمولاسیون‌های مختلفی طبق ترکیب شیمیایی موادّ اوّلیه در نظر گرفته شد. پس از مخلوط کردن موادّ اوّلیّه و شکل‌دهی توسّط روش پرس و سپس خشک کردن، بدنه‌های حاصل در دماهای مختلف پخته شد و روند پیشرفت فازی آن‌ها توسّط دستگاه ایکس آر دی مورد بررّسی قرار گرفت. علاوه بر آنالیز فازی، ضریب انبساط حرارتی بدنه‌های حاصل نیز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که از آندالوزیت همدان می توان در ساخت بدنه‌های دیرگداز کودیریت - مولایت استفاده کرد. با توجّه به نتایج حاصل، دمای مناسب جهت تشکیل و حضور همزمان فازهای کوردیریت و مولایت با مقادیر مناسب در این بدنه ۱۳۵۰-۱۳۰۰°C به مدّت ۱۰ ساعت تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: کوردیریت، مولایت، آندالوزیت، آنالیز فازی، انبساط حرارتی

Application of Hamedan's andalusite for the manufacturing of cordierite-mullite refractory materials

Seyad Hossein Badiee[1]& Sasan Otroj[2]
1) Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Maybod Branch, Maybod, I.R. Iran
2) Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, I.R. Iran

Abstract

In this research, andalusite of Hamedan and other Iranian raw materials such as talc, kaolin, calcined alumina and magnesium oxide have been used for manufacturing of cordierite-mullite refractory materials. Different formulations were considered according to the chemical composition of raw materials. Then, raw materials were mixed, uniaxially pressed and after drying fired at different temperatures. Phase analysis (by XRD) and thermal expansion coefficient of fired samples were investigated. The results showed that Hamedan's andalusite can be used for the manufacturing of cordierite-mullite refractory materials. The optimum firing temperature range for cordierite and mullite phase formation is 1300-1350 ºC for 10 hrs.

Keywords: Cordierite, mullite, andalusite, phase analysis, thermal expansion

۱- مقدّمه

مواد و ترکیبات کوردیریتی یا کردیریت ($2MgO.\ 2Al_2O_3.5SiO_2$) به دلیل دارا بودن ضریب انبساط حرارتی پایین ($۲-۶\times۱۰^{-۶}\ ^{o}C^{-۱}$) دارای مقاومت به شوک حرارتی بالایی می‌باشند. به همین دلیل در ساخت

محصولات دیرگداز همانند ابزار آلات کوره، مشعل های گاز و غیره کاربرد گسترده‌ای دارند. کوردیریت در طبیعت بسیار کمیاب بوده و به همین دلیل به‌صورت مصنوعی تهیّه می شود. جهت رسیدن به فاز کوردیریت بایستی درصد مشخصی از اکسیدهای خالص MgO و SiO_2 و Al_2O_3 فراهم باشد، ولی چون تهیّه‌ی این اکسیدها به‌طور خالص گران بوده و در همه‌ی موارد امکانپذیر نیست، به همین دلیل از موادّ اوّلیّه، معدنی تأمین کننده‌ی این اکسیدها در ترکیب استفاده می‌شود. ترکیبات و مواد ارزان قیمتی همانند اکسیدها، کربنات‌ها، هیدروکسیدها و همچنین مینرال‌هایی همانند تالک، سپیولیت، کلریت، کائولن و دیگر انواع رس‌ها نیز می‌توانند در تهیّه‌ی این مادّه مورد استفاده قرار گیرند. به‌طورکلّی فاز کوردیریت از واکنش در حالت جامد اکسیدهای MgO SiO_2 و Al_2O_3 یا موادّ شامل این اکسیدها در دمای ۱۱۰۰-۱۴۰۰°C تشکیل می شوند که این دما به نوع و ویژگی موادّ اوّلیّه‌ی مصرفی بستگی زیادی دارد.

(Grojean 1993, Camerucci et al. 2001, Camerucci et al. 2003)

یکی از فرمولاسیون های مناسب برای تشکیل فاز کوردیریت در بدنه، استفاده از کائولن و تالک مناسب با نسبت های ۷۰ به ۳۰ می‌باشد. این نسبت در دماهای حدود ۱۲۵۰°C و با زمان ماندگاری >۵h می تواند باعث تشکیل فاز کوردیریت گردد. کائولن مناسب برای این منظور بایستی میزان Al_2O_3 بیشتر از ۲۰ درصد و تالک مناسب نیز بایستی میزان MgO بیشتر از ۳۰ درصد در ترکیب شیمیایی خود داشته باشند (Goldberg 2002). بدنه های کوردیریتی، دارای رنج پخت کوتاهی هستند. در دماهای پایین فاز کوردیریت تشکیل نمی‌شود و اگر کمیدما افزایش یابد فازهایی از قبیل فورستریت، مولایت یا مذاب ایجاد می شود که تشکیل این فازها ویژگی اصل مورد نظر را که پایین بودن ضریب انبساط حرارتی می‌باشد از بین می‌برد. فقط در یک رنج کوتاه پخت بیشترین درصد کوردیریت و در نتیجه کمترین ضریب انبساط حرارتی ایجاد می شود (Grojeah 1993, Goldberg 2002,Maiti & Singh 2001) با وجود مقاومت بالا در برابر شوک حرارتی، کوردیریت استحکام مکانیکی پایینی به‌ویژه در حوالی دمای ۱۳۰۰°C دارد که به همین دلیل از فازهایی همانند مولایت برای جبران و افزایش استحکام آن استفاده می‌شود. مولایت موجب افزایش استحکام خصوصاً استحکام تحت بار بدنه شده، درحالی‌که کوردیریت به دلیل ضریب انبساط حرارتی پایین، موجب افزایش مقاومت به شوک حرارتی می گردد. بنابراین استفاده همزمان از فازهای مولایت و کوردیریت در بدنه می‌تواند خواصّ مناسب هر دو فاز به‌ویژه شوک‌پذیری را برای بدنه فراهم نماید. ابزارآلات کوره همانند ساگارهای حمل قطعات جهت پخت در کوره‌های سرامیکی در معرض تنش‌های مکانیکی و حرارتی در زمان کاربرد قرار می گیرند. بنابراین باید مقاومت خوب و مناسبی در برابر شوک حرارتی داشته باشند و از طرف دیگر استحکام و دیرگدازی مناسبی نیز به‌این منظور مورد نیاز است. به همین دلیل کامپوزیت‌های کوردیریت-مولایت برای ساخت ابزارآلات کوره استفاده فراوانی دارد(Camerucci . et al. 2001, Mazel et al. 2002) مولایت طبیعی کمیاب است، اما می توان مولایت را با حرارت دادن مینرال‌های آلومینوسیلیکات طبیعی و همچنین از طریق روش‌های شیمیایی به‌دست آورد. استفاده از مینرال‌های طبیعی به دلیل مسائل اقتصادی مطلوب‌تر است که از جمله مینرال‌های مورد توجّه می توان به کانی های گروه آندالوزیت اشاره نمود. کانی های گروه آندالوزیت $Al_2O_3SiO_2$ حاصل دگرگونی رسوبات آلومین‌دار (اغلب رسی) هستند و در شیشه‌ها و سنگ های پلیتی دیده می‌شوند. کانی های این گروه در رخساره‌ی دگرگونی با شرایط دما و فشار متفاوت تشکیل شده‌اند و بیانگر شرایط دگرگونی و تغییرات دما و فشار تشکیل هستند. آندالوزیت می‌تواند به صورت سه فاز یا ساختمان کریستالی مختلف تشکیل شود که پلی‌مرف‌های آن به‌صورت آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت می‌باشند. به‌طورکلّی پلی‌مرف‌های مختلف آلومینوسیلیکات‌ها (کیانیت، سیلیمانیت، آندالوزیت) در شرایط اکسیدی و با حرارت دادن در دمای بالا به مولایت۳/۲ به همراه SiO_2 به صورت سیلیس آمورف و کریستوبالیت) تبدیل می شوند. دمای این تبدیل در این کانی‌ها تا حدودی متفاوت است، امّا در آندالوزیت تشکیل مولایت از ۱۲۸۰°C آغاز می‌شود و تبدیل کامل آن منجر به تشکیل حدود ۸۰٪ مولایت و ۲۰٪ شیشه می‌شود. بنابراین می‌تواند یکی از منابع مناسب جهت ایجاد فاز مولایت در بدنه‌ی مورد استفاده قرار گیرد.(Bouchetou et al. 2005, Boccaccini et al. 2005, Ohira et al. 1996)

هدف از انجام این تحقیق ساخت بدنه‌های کوردیریت-مولایت با استفاده از موادّ اوّلیّه‌ی داخلی و برّرسی آنالیز فازی بدنه‌های حاصل پس از پخت در دماهای مختلف می‌باشد. به‌این منظور از آندالوزیت همدان با درصد ثابت (۵۰ درصد وزنی) استفاده شده و بدنه‌های

ساخته شده در دماهای مختلفی از ۱۲۵۰ تا ۱۴۰۰°C پخته شده‌اند. علاوه بر آنالیز فازی، ضریب انبساط حرارتی بدنه های حاصل پس از پخت نیز اندازه گیری و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اوّلیه‌ی مصرفی

مواد اوّلیه‌ی مورد مصرف همه از منابع داخلی تأمین شده است که شامل: آندالوزیت همدان، تالک ازنا، آلومینای کلسینه شده جاجرم، کائولن زنوز و اکسیدمنیزیم بیرجند می‌باشد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی مواد اوّلیه‌ی مصرفی ارائه شده است.

۲-۲- انتخاب دانه بندی و فرمولاسیون

با توجّه به اینکه مناسبترین ترکیب شیمیایی و فرمولاسیون برای تشکیل فاز کوردیریت در بدنه استفاده از کائولن و تالک مناسب با نسبت‌های ۷۰ به ۳۰ می‌باشد، بنابراین از این نسبت نیز برای تهیّه‌ی فرمولاسیون‌ها استفاده شده است. ولی با توجّه به پایین بودن درصد Al_2O_3 در ترکیب شیمیایی خاک‌های کائولن و همچنین MgO در تالک‌های داخلی، از آلومینای کلسینه شده و اکسید منیزیم جهت جبران این اکسیدها در ترکیب شیمیایی مواد اوّلیه‌ی مصرفی استفاده شده است. یکی دیگر از جنبه های استفاده از آلومینای کلسینه شده در ترکیب بدنه‌ها، واکنش آن با SiO_2 تشکیل شده در اثر تجزیه آندالوزیت و در نتیجه تشکیل فاز مولایت می‌باشد. با توجّه به موارد اشاره شده، ترکیب موادّ اوّلیه‌ی مورد مصرف و درصدهای وزنی آن‌ها جهت ساخت بدنه های کوردیریت- مولایت در جدول ۲ ارائه شده است. در تمامی ترکیبات، درصد آندالوزیت مورد استفاده ثابت (۵۰ درصد) در نظر گرفته شده است.

جدول۱- ترکیب شیمیایی مواد اولیه مصرفی.

نوع ماده اولیه	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)						
	L.O.I	TiO_2	Fe_2O_3	Na_2O+K_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2
آندالوزیت	۷۳	۰/۱	۰/۴	۲/۱۴	۰/۰۹	۵۹/۲۰	۳۸/۸۷
تالک	۲۲/۴	-	۱/۲۵	۰/۰۵	۲۸/۱۷	۰/۳	۶۳/۸۰
آلومینای کلسینه ده			۰/۰۲	۰/۱		۹۹/۶	۰/۰۱
کائولن	۱۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۱۹	۲۳/۱	۶۲/۷۴
اکسید منیزیم		۰/۱	۰/۴۸	۰/۰۱	۹۸/۵	۰/۰۶	۰/۱۳

جدول۲- ترکیب مواد اولیه مورد مصرف و درصدهای وزنی آن‌ها برای ساخت بدنه های کوردیریت - مولایت

کد نمونه	مواد اولیه مصرفی (درصد وزنی)				
	کائولن	تالک	آلومینا	اکسید منیزیم	آندالوزیت
۱	۳۵	۱۵	-	-	۵۰
۲	۳۵	۱۳	-	۲	۵۰
۳	۳۵	۱۱	-	۴	۵۰
۴	۳۵	۹	-	۶	۵۰
۵	۳۳	۴	۲	-	۵۰
۶	۳۳	۱۳	۲	۲	۵۰
۷	۳۳	۱۱	۲	۴	۵۰
۸	۳۱	۴	۴	-	۵۰
۹	۳۱	۱۳	۴	۲	۵۰
۱۰	۳۱	۱۱	۲	۴	۵۰
۱۱	۳۱	۹	۴	۶	۵۰

۲-۳- روش ساخت و بررّسی خواص نمونه ها

به دلیل اینکه تالک، کائولن، آلومینا و همچنین اکسید منیزیم در کنار هم باعث تشکیل فاز کوردیریت به‌عنوان فاز اتصالی ترکیب می‌شوند، بنابراین اندازه ذرّات آن‌ها از اهمیّت زیادی جهت انجام واکنش مناسب بین آن‌ها و تشکیل فاز کوردیریت برخوردار است. به این منظور پس از توزین موادّ اوّلیه، هر یک از ترکیبات جهت هموژن‌سازی به مدّت ۴۵ دقیقه آسیاب‌تر شد و سپس ترکیبات ترساب شده به مدّت ۲۴ ساعت در خشک‌کن قرار گرفت تا آب آن‌ها تبخیر شود. استفاده از گرانول مواد اوّلیه در روش پرس از اهمیّت زیادی برخوردار است، به‌این جهت مخلوط‌های خشک شده با اضافه شدن آب و عبور از الک مش ۶۰ به‌صورت گرانول تهیّه شدند. جهت تهیّه‌ی گرانول‌ها از بچ‌ها حدود ۳ الی ۵ درصد رطوبت اضافه گردید. به منظور شکل‌دهی گرانول‌ها و ساخت بدنه، از پرس هیدرولیک برقی با فشار حدود ۴۰۰ kg/cm^2 استفاده گردید.

پس از شکل‌دهی توسّط پرس، نمونه‌ها در خشک‌کن با درجه‌ی حرارت ۱۱۰°C نگهداری و پس از خشک‌شدن کامل در دماهای مختلف (۱۲۵۰، ۱۳۰۰، ۱۳۵۰ و ۱۴۰۰°C) در کوره الکتریکی به مدت ده ساعت پخته شدند. سپس فازهای تشکیل شده در نمونه‌ها پس از پخت در هر دمایی توسّط دستگاه آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) مدل STOE و با استفاده از پرتو Cu kα شناسایی شد. همچنین ضریب انبساط حرارتی نمونه‌ها (T.E.C) پس از پخت در دماهای مختلف مورد

اندازه‌گیری و برّرسی قرار گرفت. به‌این منظور از دستگاه دیلاتومتری NETZSCH DILمدل 402EP استفاده گردید.

۳- بحث و بررسی

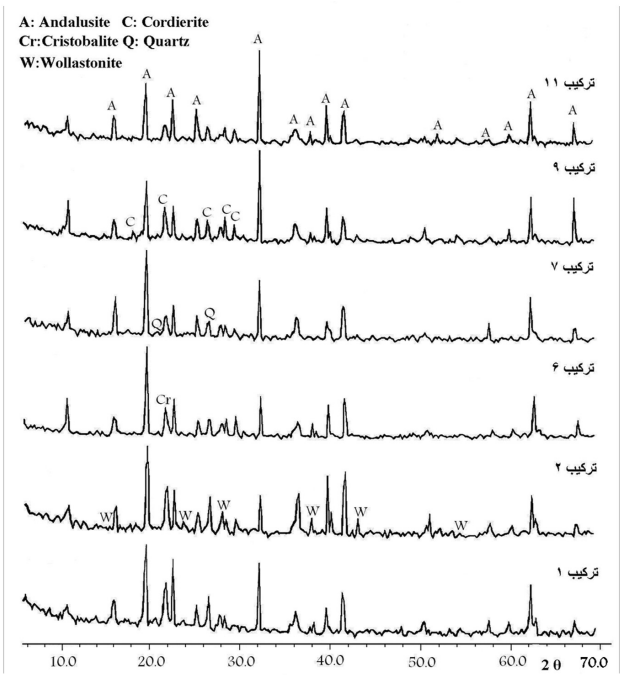
۳-۱- تأثیر ترکیب مواد اوّلیّه بر تشکیل فاز

در جدول ۳ نتایج ضریب انبساط حرارتی نمونه‌های مورد برّرسی با فرمولاسیون‌های مختلف و پخته‌شده در دمای ۱۲۵۰ °C ارائه شده است. بعضی از ترکیبات (۱، ۲، ۶، ۷، ۹ و ۱۱) دارای ضریب انبساط حرارتی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند. به‌طورکلّی ضریب انبساط حرارتی مواد کامپوزیت را تقریباً با مجموع ضرایب انبساط حرارتی هر فاز ضرب در جزء حجمی آن فاز می‌توان برابر در نظر گرفت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ترکیبات۱، ۲، ۶، ۷، ۹ و ۱۱ فاز یا فازهای مناسب با ضریب انبساط حرارتی پایین همانند کوردیریت می‌تواند تشکیل شده باشد. با توجّه به این مطلب که هر چقدر ضریب انبساط حرارتی کمتر باشد مقاومت در برابر شوک حرارتی آن بالاتر خواهد بود و ترکیبات یاد شده می‌توانند مقاومت در برابر شوک حرارتی بیشتری را نیز نشان دهند. در جدول ۳ ، بدنه ۶ دارای کمترین ضریب انبساط حرارتی در بین بدنه‌های دیگر است و احتمال تشکیل فاز کوردیریت در آن بیشتر می‌باشد. در تصویر ۱ نتایج الگوی پراش اشعه ایکس ترکیب‌های دارای کمترین ضریب انبساط حرارتی ارائه شده است.

طبق نتایج تصویر ۱ مشاهده می‌شود که در همه نمونه‌های مورد برّرسی، فازهای اصلی ترکیب شامل آندالوزیت و کوردیریت می‌باشند. همچنین مقادیر جزئی از فازهای کوارتز، ولاستونیت و کریستوبالیت نیز وجود دارد و قابل شناسایی است. به دلیل تشکیل فاز کوردیریت در تمام نمونه‌ها و شدّت پیک‌های این فاز می‌توان بیان کرد که مقدار بیشتری از این فاز در ترکیب بدنه ۶ تشکیل شده است. بدین ترتیب نمونه‌ی ۶ به لحاظ ترکیب شیمیایی و درصد مواد اوّلیه مصرفی، شرایط بهتری برای تشکیل فاز کوردیریت در دمای ۱۲۵۰ °C دارد. از طرف دیگر ضریب انبساط حرارتی پایین ترکیب ۶ (جدول ۳) می‌تواند به مقدار بیشتر فاز کوردیریت در ترکیب نسبت داده شود. فاز آندالوزیت ناشی از ذرّات آندالوزیت مورد استفاده در ترکیب است که در تمام نمونه‌های مورد برّرسی در دمای ۱۲۵۰ °C تقریباً بدون تغییر باقی مانده است. فاز آندالوزیت در دمای بالا می‌تواند به مولایت تبدیل شود که به دلیل عدم شناسایی فاز مولایت در نمونه‌ها، مشخّص می‌شود که دمای این تبدیل بالاتر از ۱۲۵۰ °C می‌باشد.

۳-۲- تأثیر دمای پخت بر تشکیل فاز

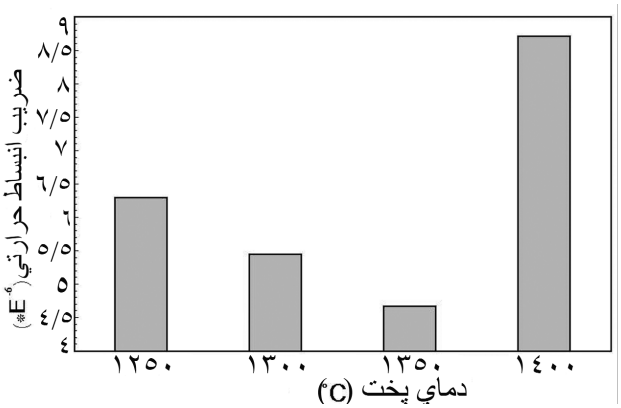
به علّت مقدار بیشتر فاز کوردیریت در ترکیب ۶، این نمونه جهت مطالعه و برّرسی تأثیر دماهای مختلف پخت بر تشکیل فاز انتخاب شد. در تصویر ۲ ضرایب انبساط حرارتی ترکیب ۶ پس از پخت در دماهای مختلف نشان داده شده است که با افزایش دمای پخت تا ۱۳۵۰ °C مقدار ضریب انبساط حرارتی ترکیب ۶ کاهش می‌یابد. امّا با افزایش بیشتر دمای پخت (۱۴۰۰ °C)، افزایش قابل ملاحظه‌ای در



تصویر ۱- الگوی پراش اشعه ایکس ترکیب‌های پخته شده در ۱۲۵۰ °C و دارای کمترین ضریب انبساط حرارتی.

جدول۳- نتایج تست شوک حرارتی نمونه هایی با فرمولاسیون های مختلف

کد نمونه	ضریب انبساط حرارتی (C/۶-۱۰×)
۱	۶/۳۹۰
۲	۶/۱۰۲
۳	۶/۵۱۸
۴	۶/۶۶۱
۵	۶/۴۱۹
۶	۵/۳۰۳
۷	۵/۸۲۲
۸	۵/۴۱۱
۹	۵/۴۱۸
۱۰	۶/۴۰۶
۱۱	۶/۴۰۲

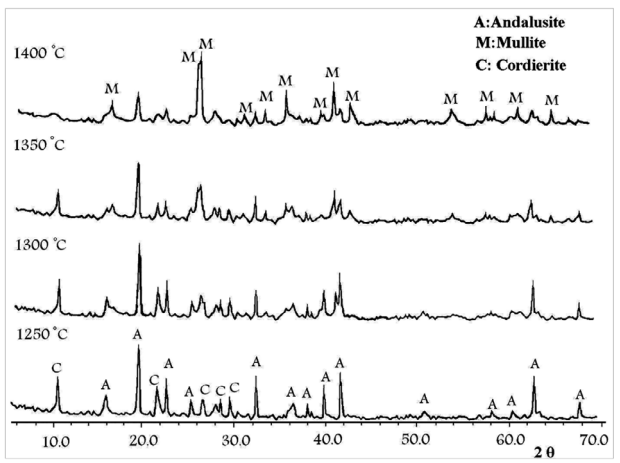


تصویر ۲- ضرایب انبساط حرارتی ترکیب ۶ پس از پخت در دماهای مختلف.

مقدار این ضریب دیده می‌شود. کاهش مقدار ضریب انبساط حرارتی ترکیب ۶ با افزایش دما را می‌توان به افزایش میزان فاز کوردیریت و یا تشکیل فاز مولایت ناشی از تجزیه آندالوزیت نسبت داد. در تصویر ۳ الگوی پراش اشعه ایکس بدنه ۶ پس از پخت در دماهای مختلف ارائه شده است که با افزایش دمای پخت از ۱۳۰۰°C، شدّت پیک‌های فاز آندالوزیت شروع به کاهش یافتن می‌کند و به‌طور همزمان پیک‌های فاز مولایت ظاهر می‌شود و با افزایش دمای پخت نیز شدّت پیک‌های آن افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که فاز آندالوزیت مصرفی با افزایش دما (۱۳۰۰°C) تجزیه می‌شود و به فاز مولایت تبدیل می‌شود و به نظر می‌رسد که این تبدیل در دماهای بالاتر از ۱۴۰۰°C کامل می‌گردد.

به طورکلّی تبدیل آندالوزیت به مولایت باعث تشکیل سیلیس آمورف طبق واکنش زیر می‌شود:

$$3Al_2O_3.2SiO_2 \rightarrow 3Al_2o_3.2Sio_2+SiO_2 \quad -۱$$



تصویر ۳- الگوی پراش اشعه ایکس ترکیب ۶ پس از پخت در دماهای مختلف.

فاز شیشه‌ای حاصل می‌تواند بین دانه‌ها تشکیل شود و با نرم شدن در دماهای بالا باعث لغزش دانه‌ها گردد. این امر می‌تواند مشکلی برای کاربرد مواد دیرگداز کوردیریت-مولایت محسوب شود. با ایجاد فاز شیشه‌ای در دماهای بالا دیرگدازی تحت بار بدنه کاهش می‌یابد و دمای کارکرد بدنه نیز محدود می‌گردد. به همین دلیل افزودن آلومینا به ترکیب جهت تبدیل سیلیس آمورف به مولایت طبق واکنش زیر مدّ نظر قرار گرفته است:

$$3Al_2O_3+2\ SiO_2 \rightarrow 3Al_2O_3.2SiO_2 \quad -۲$$

مولایت تشکیل شده توسّط واکنش (۱) مولایت اوّلیّه نامیده می‌شود، در حالی که به مولایت تشکیل شده توسط واکنش (۲)، مولایت ثانویه اطلاق می‌گردد. واکنش (۲) در محدوده‌ی ۱۳۰۰-۱۳۵۰°C یعنی همزمان با تشکیل سیلیس آمورف طبق واکنش (۱) شروع می‌شود. طبق آنالیز فازی ارائه شده در تصویرهای ۱ و ۳ مشخّص می‌گردد که فاز کوردیریت در دمای ۱۲۵۰°C در این ترکیب تشکیل می‌شود و با افزایش دمای پخت تمایل به تجزیه و کاهش یافتن نشان می‌دهد. از دمای ۱۳۵۰°C به بالا شدّت پیک‌های فاز کوردیریت تشکیل شده در بدنه کاهش زیادی می‌یابد، به‌طوری‌که در دمای ۱۴۰۰°C اثر خیلی کمی از این فاز در ترکیب بدنه دیده می‌شود. به طور کلّی محدوده‌ی پخت بدنه‌های دارای درصد کوردیت بالا کوتاه می‌باشد. در دماهای پایین فاز کوردیریت تشکیل نمی‌شود و با افزایش اندکی دما تجزیه می‌شود و به فازهای دیگر یا مذاب تبدیل می‌گردد که تشکیل این فازها، ضریب انبساط حرارتی ترکیب را افزایش می‌دهند. بنابراین علّت افزایش ضریب انبساط حرارتی ترکیب ۶ در اثر ازدیاد دما (۱۳۵۰°C تا ۱۴۰۰°C) را می‌توان به تجزیه فاز کوردیریت نسبت داد.

با توجّه به نتایج حاصل محدوده‌ی دمای پخت مناسب برای تشکیل فاز کوردیریت در بدنه ۶ بین ۱۲۵۰°C تا ۱۳۵۰°C می‌باشد. از طرف دیگر از دمای ۱۳۰۰°C به بالا نیز به خاطر تجزیه آندالوزیت در ترکیب بدنه، فاز مولایت تشکیل می‌شود. بنابراین دمای پخت مناسب برای تشکیل و حضور همزمان فازهای کوردیریت و مولایت در ترکیب بدنه ۱۳۰۰°C تا ۱۳۵۰°C می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

تبدیل فاز آندالوزیت به مولایت از دمای ۱۳۰۰°C شروع می‌شود و می‌تواند در دماهای بالاتر از ۱۴۰۰°C تکمیل گردد. از طرف دیگر فاز

کوردیریت در دمای ۱۲۵۰°C در بدنه تشکیل می‌شود و با افزایش دمای پخت از ۱۳۵۰°C به بالا در اثر تجزیه، مقدار این فاز به شدّت کاهش می‌یابد. بنابراین محدوده‌ی دمایی مناسب جهت تشکیل و حضور همزمان فازهای کوردیریت و مولایت در این بدنه‌ها ۱۳۰۰°C تا ۱۳۵۰°C به مدّت ۱۰ ساعت می‌باشد. دماهای پخت کمتر یا بیشتر از این محدوده باعث افزایش قابل توجّه ضریب انبساط حرارتی می‌گردد و در نتیجه می‌تواند باعث کاهش مقاومت در برابر شوک حرارتی بدنه گردد.

۵- مراجع

Boccaccini, D. N., Leonelli, C., Rivasi, M. R., Romagnoli, M. & Boccaccini, A. R., 2005, "Microstructural investigations in cordierite-mullite refractories ceramics", *Ceramic International, Vol. 31: 417-432.*

Bouchetou, M. L., Ildefonse, J. P., Poirier, J. & Daniellou, P., 2005, "Mullite grown from fired andalusite grains: the role of impurities and of the high temperature liquid phases on the kinetics of mullitization and consequences on thermal shocks resistance", *Ceramic International, Vol. 31: 999-1005.*

Camerucci, M. A., Urretavizcaya, G. & Cavalieri, A. L., 2001, "Mechanical behavior of cordierite and cordierite-mullite materials evaluated by indentation techniques", *J. of Europ. Ceram. Soc., Vol. 21: 1195- 1204*

Camerucci, M. A., Urretavizcaya, G. & Cavalieri, A. L., 2003, "Sintering of Cordierite based Materials", *Ceramic International, Vol. 29: 159-168.*

Goldberg, G. J., 2002,"Cordierite-mullite refractories ceramics", *Luzenac company report, No. 3: 6-11.*

Grojean, P., 1993, "Cordierite ceramics", *Interceram, Vol. 42: 11-15.*

Maiti, K. N. & Singh, K. C., 2001, "Studies on cordierite-mullite body-part II, effect of sillimanite sand in a cordierite composition", *Trans. Ind. Ceram. Soc., Vol. 60: 167-171.*

Mazel, F., Gonon, M. & Fantozzi, G., 2002, "Manufacture of mullite substrates from andalusite for the development of thin film solar cells", *J. of Europ. Ceram. Soc., Vol. 22: 453-461.*

Ohira, H., Ismail, M. G. M. U., Yamamoto, Y., Akiba, T. & Somya S., 1996, "Mechanical properties of high purity mullite at elevated temperatures", *J. of Europ. Ceram. Soc., Vol. 16: 225-229.*