

تأثیر میزان گرافیت و رزین بر خواص دیرگدازهای دولوما گرافیتی

ساناز نقیبی^{۱*}، امین جمشیدی^۲، زیارتعلی نعمتی^۳ و حسین پایدار^۴

۱- مربی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سرامیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

۴- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

*naghbi@iaush.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۹/۱۹)

چکیده

دیرگدازی بالا، مقاومت شیمیایی در مقابل سرباره، امکان تولید فولاد تمیز، سازگاری محیطی و هزینه پایین تولید از جمله مزایای دیرگدازهای دولومیتی در صنایع فولاد است. با توجه به در دسترس بودن دولومیت در ایران، ساخت دیرگدازهای دولومیتی بسیار متمرکز خواهد بود. یکی از انواع دیرگدازهای دولومیتی، دیرگدازهای دولوما- گرافیتی می باشد که به دلیل مقاومت بالا به خوردگی و شوک حرارتی، می توانند در صنایع فولاد و سیمان کاربرد داشته باشند. در این تحقیق، خواص دیرگدازهای دولوما گرافیتی با افزودنی های مختلف و شرایط تمپر متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه ها با توزیع اندازه دانه متفاوت دولوما و مقادیر مختلف گرافیت و رزین فرآوری شدند. مواد اولیه و رفتار حرارتی آنها با استفاده از XRF، XRD و STA مورد مطالعه قرار گرفت. پس از آماده سازی نمونه ها، خواص فیزیکی و مکانیکی، خوردگی در مجاورت سرباره و مقاومت به شوک حرارتی با افزایش تا ۱۱٪ کربن در سیستم اندازه گیری شد. آزمون خوردگی در مجاورت سرباره بر اساس آزمون بوته در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت انجام و عمق نفوذ اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده نشان داد که به دلیل تغییرات تدریجی در رفتار حرارتی رزین و کاهش وزن آن، خواص دما پایین سیستم تغییر یافت و استحکام فشاری سرد نمونه ها در ابتدا افزایش و در ادامه با افزایش گرافیت کاهش و مقاومت به شوک حرارتی و مقاومت به خوردگی با افزودن گرافیت بهبود یافت.

واژه های کلیدی:

دولوما، گرافیت، رزین، دیرگداز، خواص ترمومکانیکی.

۱- مقدمه

خوردگی افزایش می یابد. به نظر می رسد این امر عمدتاً به دلیل نقطه ذوب بالا (دمای ذوب گرافیت ۳۸۴۵ درجه سانتی گراد است)، ضریب هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین این ماده می باشد [۱، ۲ و ۳]. گرافیت دارای ساختار لایه ای است و به دلیل اتصال ضعیف بین لایه ها،

گرافیت در بسیاری از دیرگدازها به منظور بهبود خواص و رفتار در شرایط کاربردی مختلف به کار گرفته شده است. بر اساس اطلاعات موجود در منابع، زمانی که گرافیت در دیرگداز به کار رود، برخی خواص ماده از جمله مقاومت به شوک حرارتی و

برای انجام آزمون شوک حرارتی پس از تمپر و پخت در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت در اتمسفر احیایی، نمونه‌ها در کوره الکتریکی با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته و سپس به وسیله پمپ هوا خنک شدند. این سیکل ۵ بار تکرار شد. پس از آن استحکام خمشی نمونه‌ها اندازه‌گیری و درصد کاهش آن (به عنوان مقیاس اندازه‌گیری مقاومت به شوک حرارتی) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\% MI = \frac{Mb - Ma}{Mb} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه:

MI: درصد کاهش استحکام خمشی

Mb: استحکام خمشی قبل از شوک حرارتی

Ma: استحکام خمشی پس از شوک حرارتی می‌باشد.

برای انجام آزمون مقاومت به خوردگی در برابر سرباره، نمونه‌ها به ابعاد $114 \times 114 \times 50$ میلی‌متر بریده و حفره‌ای با قطر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر در مرکز آن ایجاد شد. سپس حفره‌ها با مقدار مساوی از سرباره کنورتور با آنالیز شیمیایی موجود در جدول (۲) پر و در کوره شاتل با دمای پخت ۱۶۰۰ درجه سانتی گراد و زمان نگهداری ۵ ساعت قرار داده شد. پس از خروج از کوره، نمونه‌ها توسط اهر الماسه و در امتداد محور حفره برش داده شدند. اندازه‌گیری عمق نفوذ توسط میکروسکوپ نوری انجام گرفت.

جدول (۱): آنالیز شیمیایی دولوما.

اکسید	درصد وزنی
MgO	۴۰/۱۶
CaO	۵۸/۴۰
Fe ₂ O ₃	۰/۶۴
Al ₂ O ₃	۰/۱۷
SiO ₂	۰/۵۲
Na ₂ O	۰/۰۱ >
K ₂ O	۰/۰۱ >
TiO ₂	۰/۰۹

تمایل شدیدی برای واکنش با سایر مواد نشان می‌دهد و همچنین به دلیل انرژی سطحی پایین، این ماده به راحتی به وسیله مذاب مواد دیگر تر نمی‌شود.

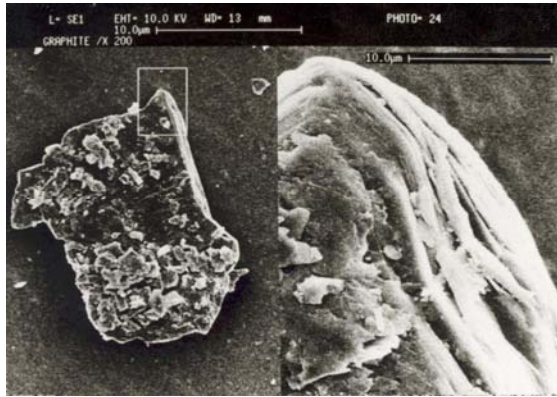
ناخالصی موجود در مواد دولومیتی با توجه به منع آن می‌تواند متفاوت باشد. دولومیت پس از عملیات حرارتی به آهک و پریکلز تبدیل می‌شود.

برخی از مهمترین ویژگی‌های دیرگدازهای دولومیتی نیاز این دسته از مواد به دمای ددبرن^۱ بالا و هیدراتاسیون سریع، محدودیت زمان نگهداری و همچنین ضعف در برخی خواص می‌باشد.

هدف از این تحقیق ساخت دیرگداز دولوما گرافیتی و بهینه‌سازی خواص آن در مقایسه با دیرگدازهای دولومیتی و بدون افزودنی گرافیت می‌باشد.

۲- روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این کار شامل دولومیت سینتر شده شرکت نسوز آذر ایران، گرافیت ساخت کشور چین با خلوص بالا و رزین جامد (بدون آب) بود. دولومیت در دمای ۱۶۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد درون کوره دوار ددبرن شد. آنالیز و تصویر SEM آن به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۱) و آنالیز EDX آن در شکل (۲) ارائه شده است. در شکل (۱) نقاط تیره و روشن به ترتیب مربوط به دانه‌های CaO و MgO می‌باشند. در اینجا CaO به عنوان فاز زمینه و MgO فاز ثانویه است. مقادیر متفاوت گرافیت پولکی از ۲/۵ تا ۱۰ درصد در فرمولاسیون به کار رفته است. تصویر SEM از این ماده در شکل (۳) و آنالیز STA از رزین بدون آب مورد استفاده در شکل (۴) نشان داده شده است. درصد رزین در فرمول ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ بوده است. همه نمونه‌ها در محدوده دمای ۱۷۵ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تمپر شدند. برای جلوگیری از هیدراتاسیون، نمونه‌ها در نفت سفید برش و نگهداری شدند. خواص مکانیکی و فیزیکی مانند استحکام فشاری سرد، استحکام خمشی، دانسیته، تخلخل، شوک حرارتی و آزمون خوردگی برای همه نمونه‌ها انجام شد.



شکل (۳): تصویر SEM از گرافیت پولکی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر.

جدول (۲): آنالیز شیمیایی سرباره مورد استفاده.

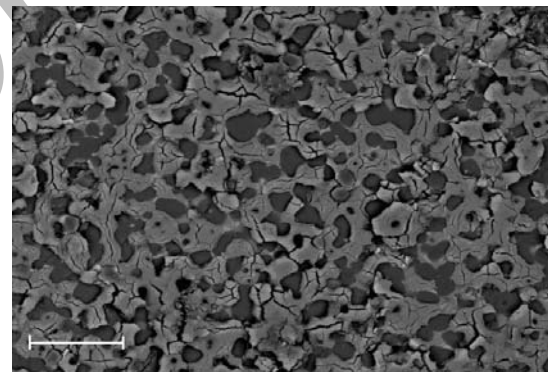
اکسید	درصد وزنی
Al ₂ O ₃	۱/۳۲
MgO	۰/۱۷
CaO	۶۳/۲۱
Fe ₂ O ₃	۱۶/۱۰
TiO ₂	۲/۴۴
SiO ₂	۹/۴۹
MnO	۵/۴
Na ₂ O	<۰/۰۱
K ₂ O	<۰/۰۱
LOI	۱/۷۵

۳- نتایج و بحث

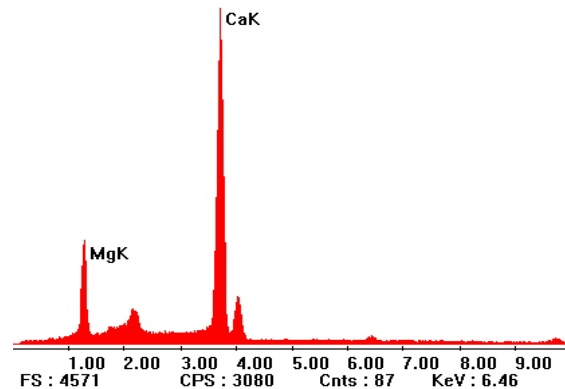
شکل (۴) آنالیز STA رزین را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، کاهش وزن رزین از دمای حدود ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و در حوالی ۴۱۹ درجه سانتی‌گراد به بیش از ۶۰ درصد می‌رسد. پس از آن، تغییرات وزن خیلی جزئی خواهد بود. بر اساس این اندازه‌گیری، کاهش وزن نهایی حدود ۸۰ درصد می‌باشد. به نظر می‌رسد وجود پیک گرمای در حوالی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در منحنی DTA مربوط به تجزیه رزین باشد.

شکل (۵) مربوط به تغییرات استحکام فشاری سرد و تخلخل با تغییر دمای تمپر است. بیشترین استحکام فشاری سرد در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود که به دلیل ایجاد اتصالات عرضی و تبدیل رزین به یک شبکه پلیمری موقت می‌باشد. افت وزن ایجاد شده در رزین پس از دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به افزایش تخلخل و در نتیجه آن به کاهش استحکام سرد نمونه‌ها می‌انجامد.

نتایج مربوط به توزیع اندازه ذرات (که بر اساس روابط آندریازن به دست آمد) در شکل‌های (۶) و (۷) دیده می‌شود. با توجه به این دو شکل، استحکام در نمونه n برابر ۰/۴۵ بیش از سایرین بود. با افزایش مقدار n استحکام افزایش یافت که علت آن را می‌توان در کاهش میزان تخلخل‌ها دانست.



شکل (۱): تصویر SEM از ذرات دولوما با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر، نقاط روشن CaO و نقاط تیره MgO بوده و طول شاخص معادل ۵۰ میکرون است.

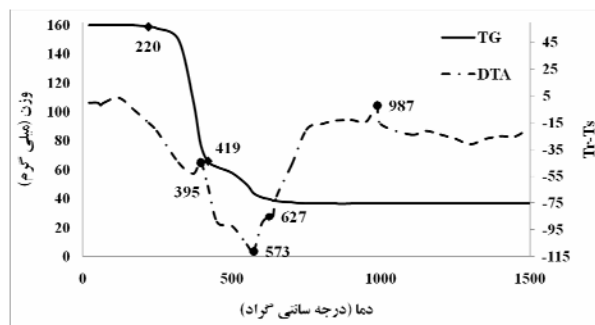


شکل (۲): آنالیز EDX از دولوما.

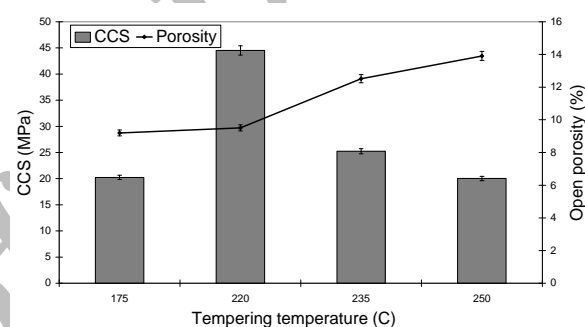
شکل‌های (۸) و (۹) نشان‌دهنده تأثیر میزان رزین و گرافیت به صورت همزمان است. با توجه به این شکل‌ها، هر دو پارامتر استحکام فشاری سرد و استحکام خمشی با اضافه شدن گرافیت (در همه مقادیر رزین) کاهش یافته‌اند. این امر به دلیل ماهیت پولکی گرافیت است که در جهت $\langle 0001 \rangle$ از طریق پیوندهای واندروالسی و در جهت عمود بر آن، به وسیله پیوندهای کووالانسی اتصال یافته و هیچ پیوند شیمیایی بین ذرات آن و زمینه وجود ندارد. در واقع به دلیل اینکه ذرات گرافیت در دمای پایین اتصالی با ذرات دولوما ایجاد نمی‌کنند، باعث عدم پیوستگی در ساختار می‌شوند، این ویژگی است که منجر به کاهش استحکام می‌گردد [۴] و جهت رفع این مشکل در این دیرگدازها از رزین استفاده می‌شود.

در مقادیر ثابت گرافیت با اضافه شدن مقدار رزین هر دو پارامتر استحکام فشاری سرد و استحکام خمشی افزایش یافته‌اند. از آنجا که در دیرگدازهای حاوی کربن پیوند مستحکمی بین ذرات فاز اکسیدی و گرافیت وجود ندارد، از طریق رزین، پیوندها و اتصالات پلیمری به وجود می‌آید و خواص دما پایین بهبود می‌یابد. با اعمال عملیات حرارتی (تمپر کردن)، رزین باعث ایجاد شبکه پلیمری عرضی می‌شود [۴ و ۵]. این برجسته‌ترین عامل مؤثر در افزایش استحکام در این محدوده دمایی است. این نکته شایان توجه است که میزان زیاد رزین قابل استفاده نمی‌باشد، زیرا در دمای بالا منجر به ایجاد تخلخل و تضعیف خواص فیزیکی و مکانیکی می‌شود.

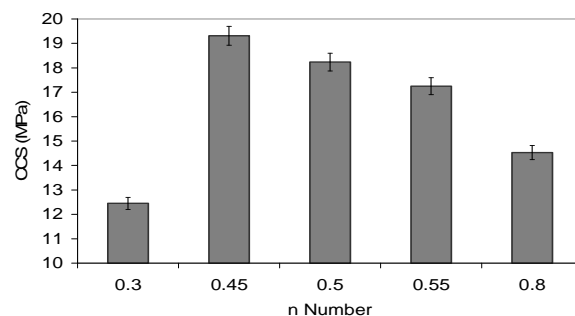
شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تأثیر مقادیر مختلف رزین و گرافیت را قبل و پس از تمپر شدن، بر دانسیته و تخلخل نمونه‌ها نشان می‌دهد. قبل از تمپر، دانسیته با افزودن گرافیت و رزین افزایش می‌یابد که به دلیل پر شدن تخلخل‌ها به وسیله این مواد می‌باشد. پس از تمپر، دانسیته با افزایش رزین (تا ۴/۵ درصد) همچنان سیر صعودی خود را طی می‌کند. این امر ناشی از اثر مثبت رزین در بهبود سهولت لغزش و حرکت ذرات در حین تراکم است. اما با افزایش گرافیت دانسیته پس از تمپر کاهش می‌یابد. علت این امر به رفتار انبساط حرارتی برگشت‌ناپذیر گرافیت مربوط می‌شود.



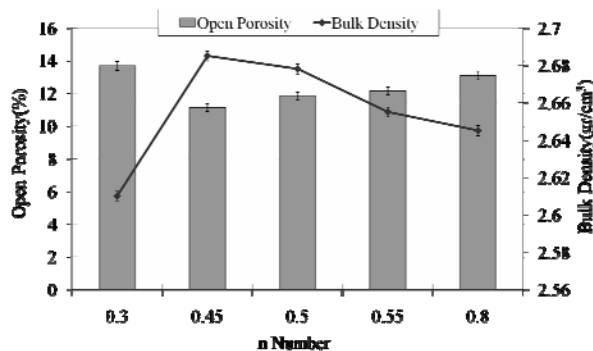
شکل (۴): دیاگرام STA از رزین در اتمسفر آرگون.



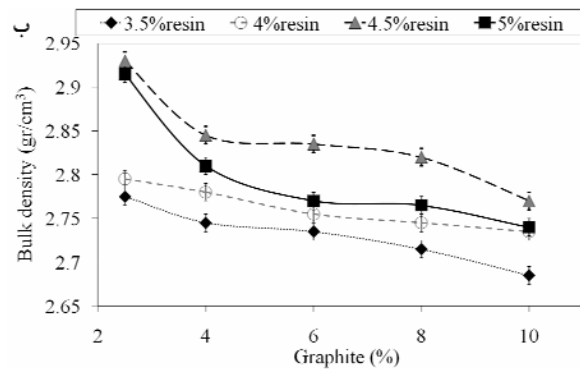
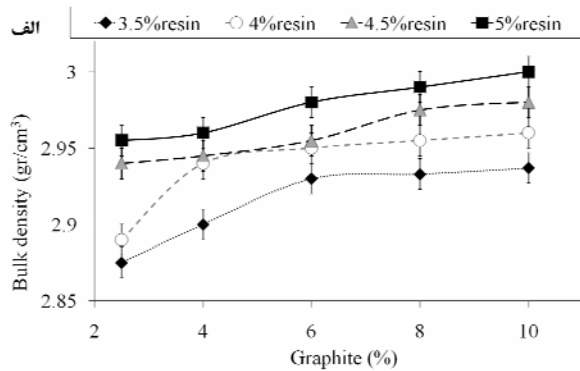
شکل (۵): تغییرات استحکام فشاری سرد و تخلخل بر حسب دمای تمپر.



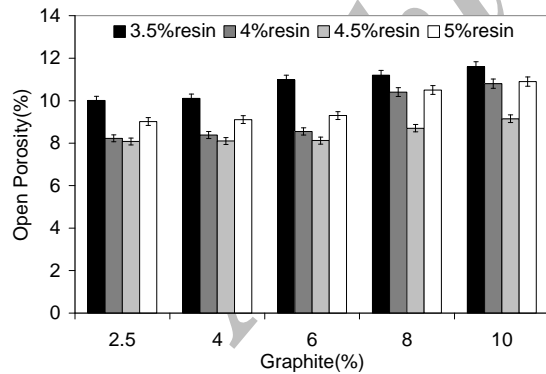
شکل (۶): تغییرات CCS با تغییر در عدد n.



شکل (۷): تغییرات دانسیته و ویسکوزیته با تغییر در عدد n.

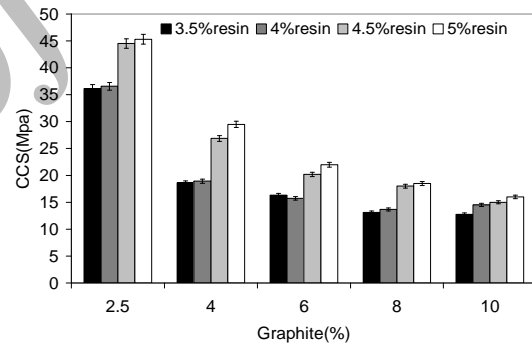


شکل (۱۰): تغییرات دانسیته در مقادیر مختلف رزین و گرافیت، (الف) قبل از تمپر و (ب) پس از تمپر.

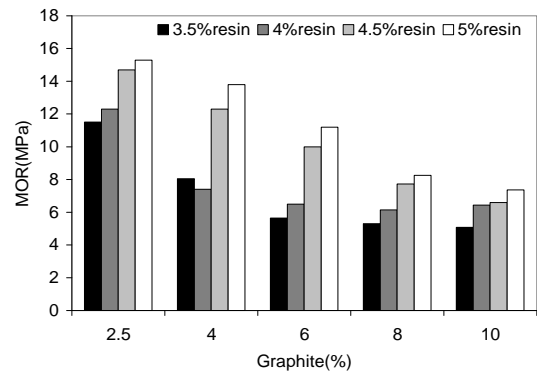


شکل (۱۱): تغییرات دانسیته در مقادیر مختلف رزین و گرافیت.

بدین صورت که پس از حرارت دهی، پولک‌های گرافیت از میان صفحات کلیواژ خود باز می‌شوند، به طوری که در اختلاف دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، حفرات انقباضی ایجاد شده به بالاتر از ۱۰ درصد حجمی در یک بدنه تمام گرافیتی می‌رسد [۶]، که این موضوع در شکل (۱۲) نشان داده شده است. اما با رسیدن مقدار رزین به ۵ درصد در تمام نمونه‌های پس از تمپر، افت دانسیته مشاهده می‌شود. در واقع با افزایش رزین به بیش از ۴/۵ درصد، خروج مواد فرار در حین تمپر، با توجه به شکل (۴)، اتفاق می‌افتد و منجر به ایجاد تخلخل می‌شود که این افزایش تخلخل بر تأثیر رزین (که موجب بهبود تراکم‌پذیری می‌شود)، غلبه نموده و دانسیته را کاهش می‌دهد.



شکل (۸): تغییرات CCS با تغییر مقادیر رزین و گرافیت.



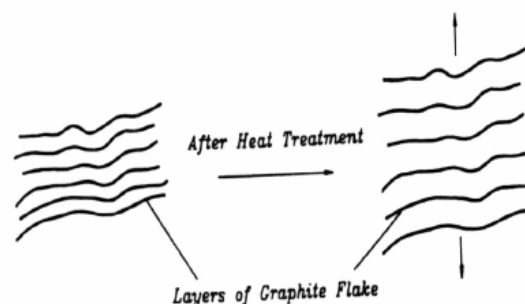
شکل (۹): تغییرات MOR با تغییر میزان مقادیر رزین و گرافیت.

جلوگیری می کنند [۷ و ۸].

با استناد به شکل (۱۵)، افزایش میزان گرافیت، عمق نفوذ سرباره را کاهش می دهد. علت این است که گرافیت از طریق احیای FeO سرباره و تبدیل آن به Fe، مانع واکنش آن با CaO که عامل اصلی خوردگی در دیرگداز دولومایی است، می شود. خاصیت تر نشدن گرافیت نیز از نفوذ هر چه بیشتر سرباره به داخل دیرگداز جلوگیری می نماید [۹].

نفوذ سرباره به داخل دیرگداز و تشکیل ترکیبات جدید در اثر واکنش با اجزای بدنه آن باعث می شود تغییرات فازی و شیمیایی در دیرگداز از سطح داغ به داخل به وجود آید. با توجه به اینکه این نواحی دارای ضرایب انبساط حرارتی متفاوت هستند، گرم و سرد شدن دیرگداز باعث لایه لایه شدن و در نتیجه فرسایش بدنه آن می شود. با استفاده از گرافیت شدت نفوذ سرباره و فرسایش دیرگداز کاهش می یابد. گرافیت به دلیل درجه تبلور و اندازه دانه بالا نسبت به کربن آمورف ناشی از رزین، مقاومت به اکسیداسیون بهتری از خود نشان می دهد و در بهبود مقاومت به خوردگی مؤثرتر است. البته نکته ای که باید در استفاده از گرافیت مورد توجه قرار گیرد آن است که اگر مقدار گرافیت از حد مطلوب بیشتر شود، با توجه به اثر منفی که روی استحکام دیرگداز دارد، می تواند سایش دیرگداز در اثر جریان و تلاطم را تشدید کند [۱، ۲ و ۱۰].

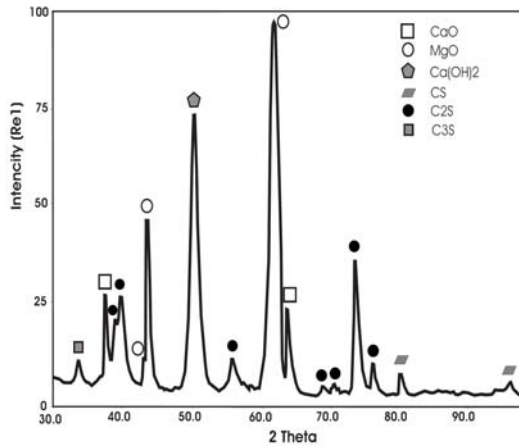
شکل (۱۶) آنالیز XRD بدنه حاوی ۶٪ گرافیت که در معرض خوردگی سرباره بوده است، را نشان می دهد. این نمونه حاوی ترکیب بدنه و ترکیبات سرباره نفوذ کرده به داخل بدنه می باشد. با توجه به این شکل، پس از آزمون خوردگی، فاز اصلی C_2S بوده است. این ترکیب دیرگداز در اثر واکنش CaO و SiO_2 موجود در سرباره به صورت یک لایه بر سطح دیرگداز ایجاد شده و از نفوذ سرباره به بدنه آن جلوگیری می کند. با توجه به جدول های (۱) و (۲)، CaO می تواند از محل سرباره و یا بدنه دیرگداز تأمین شود. دولومیت موجود در دیرگداز در دمای بالا تبدیل به دولوما شده و CaO جهت واکنش با SiO_2 تأمین می شود، اما آنچه دارای اهمیت است نقش فاز C_2S در



شکل (۱۲): باز شدن سطوح گرافیت پس از عملیات حرارتی [۶].

شکل (۱۳) اثر میزان گرافیت بر استحکام خمشی را نشان می دهد و شکل (۱۴) مربوط به اثر میزان گرافیت بر مقاومت به شوک حرارتی می باشد که بر اساس رابطه (۱) به دست آمده است. با توجه به این دو شکل با افزایش گرافیت از ۲/۵ تا ۱۰ درصد، میزان افت استحکام خمشی، کاهش یافته، بنابراین مقاومت به شوک حرارتی افزایش خواهد داشت.

دیرگدازهای گرافیتی سرامیک هایی هستند که در رده بدنه های با مقاومت مناسب در برابر شوک حرارتی به حساب می آیند. این خاصیت به مواردی مربوط است که در مقاومت به شوک حرارتی مؤثر بوده و در جهت افزایش مقاومت به شوک حرارتی عمل می کنند. انبساط حرارتی بدنه های حاوی کربن نسبت به دیگر دیرگدازهای اکسیدی پایین تر است. همچنین افزودن گرافیت به دیرگداز باعث افزایش کار شکست و کاهش مدول الاستیسیته می گردد. نتیجه حاصل از پارامترهای فوق به همراه هدایت حرارتی بالای دیرگدازهای کربنی، باعث می شود مقاومت به شوک حرارتی این بدنه ها بالا باشد. عدم وجود اتصال بین سطوح کم انرژی صفحات گرافیت و زمینه نیز عاملی مهم در جهت افزایش مقاومت به شوک حرارتی دیرگدازهای حاوی گرافیت است. در واقع ذرات گرافیت یک عدم پیوستگی ایجاد می نمایند که در غیر این صورت یک شبکه اتصال سرامیکی سخت ایجاد خواهد شد. به طور ساده تر این ناپیوستگی را می توان به صورت حفراتی در نظر گرفت که به عنوان عامل کاهش تنش های حرارتی عمل نموده و در نتیجه از رشد ترک



شکل (۱۶): آنالیز XRD نمونه در معرض خوردگی.

جلوگیری از ادامه نفوذ سرباره است. نتایج نشان می‌دهد که فازهای CS و C_3S نیز تشکیل شده‌اند.

شکل (۱۷) تصویر SEM نمونه در معرض خوردگی را نشان می‌دهد.

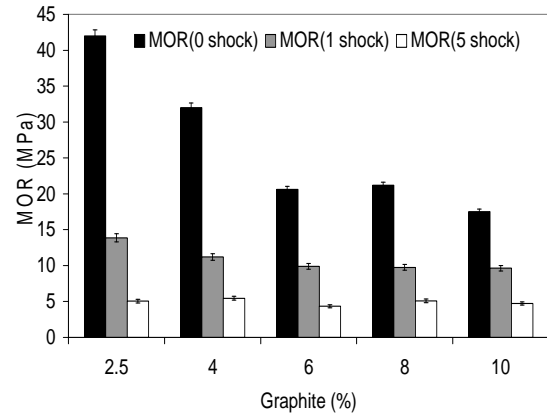
۴- نتیجه‌گیری

بیشترین حد تراکم و مقدار استحکام فشاری سرد در نمونه با $n = 0.45$ به دست آمد.

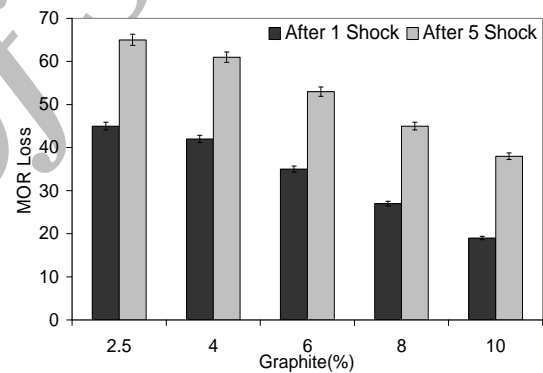
استحکام نمونه‌های دولوما گرافیت با افزایش گرافیت کاهش یافت.

با افزایش درصد رزین، به دلیل خاصیت روانکاری و پر شدن تخلخل‌ها، تراکم بیشتر شد و درصد تخلخل‌ها کاهش یافت. اما با رسیدن مقدار رزین به ۵٪، در تمام نمونه‌های تمپر شده افت دانسیته مشاهده شد.

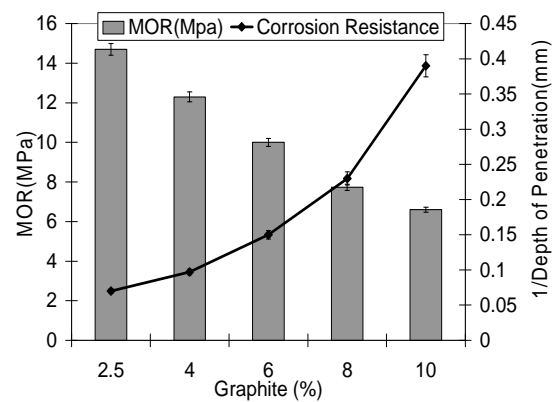
افزایش درصد گرافیت به بهبود مقاومت به خوردگی دیرگداز منجر شد، زیرا کربن موجود در گرافیت از طریق احیای FeO سرباره و تبدیل آن به Fe مانع واکنش آن با CaO که عامل اصلی خوردگی در دیرگداز دولومایی است، می‌شود. همچنین خاصیت تر نشدن گرافیت باعث شد که جلوی نفوذ هر چه بیشتر سرباره به داخل دیرگداز گرفته شود.



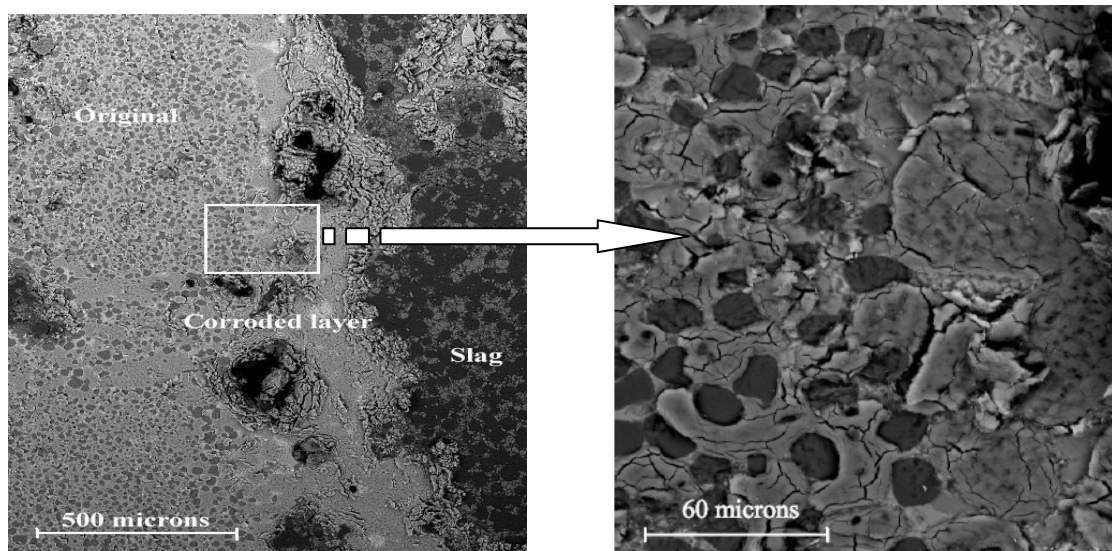
شکل (۱۳): تغییرات MOR نمونه‌ها پس از شوک حرارتی با تغییر مقدار گرافیت.



شکل (۱۴): تأثیر مقدار گرافیت بر میزان افت استحکام خمشی به عنوان معیاری برای سنجش مقاومت به شوک حرارتی.



شکل (۱۵): تغییرات MOR و مقاومت در برابر خوردگی با تغییر در مقدار گرافیت.



شکل (۱۷): تصویر SEM از نمونه در معرض خوردگی، تصویر سمت چپ با بزرگنمایی ۵۰ و تصویر سمت راست با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر.

- [6] X. Li and M. Rigaud, "Anisotropy of the Properties of Magnesia-Graphite Refractories", Journal of the Canadian Ceramic Society, Vol. 62-3, pp. 197-205, 1993.
- [7] Z. A. Nemati, S. Naghibi, M. A. Faghihi-Sani, H. Paidar and M. Poya Mehr, "The Effects of Different Parameters on the Properties of Dolomite Graphite Refractories", Proceedings of 47th International Meeting of Refractories, Aachen, Germany, pp. 63-66, 2004.

تأثیر مثبت گرافیت بر مدول یانگ، ضریب انبساط حرارتی و ضریب هدایت حرارتی دیرگدازهای دولوما گرافیتی باعث بهبود مقاومت به شوک حرارتی این دیرگداز در مقایسه با دیرگدازهای دولومیتی شده است.

[۸] ب. نظری، "تأثیر نوع مواد اولیه بر خواص بدنه‌های نسوز منزیت- دولومیتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.

- [9] J. H. Chatilion and R. D. Schmidt-Whitely, "Clean Steel and a Clean Environment with Fired Dolomite", Proceedings of International Symposium on Refractories, China, pp. 433-450, 1980.
- [10] W. Meyer, A. Franchi, G. Buchebner and M. Willingshofer, "The Use of Dolomite-Carbon-lined Ladles for the Production of Superclean Steels", Veitsch-Radex Rundsch, No. 2, pp. 32-44, 1998.

۵- مراجع

- [1] A. M. Alper, High Temperature Oxides, Academic Press INC., 1970.
- [2] P. O. R. C. Brant and V. C. Cruz, "Brazilian Flake Graphite's for Carbon Containing Refractories", Proceedings of Unitecr Congress, pp. 401-410, 1993.
- [3] C. F. Cooper, I. C. Alexander and C. J. Hampson, "The Role of Graphite in the Thermal Shock Resistance of Refractories", Transactions and Journal of the British Ceramic Society, Vol. 84-2, pp. 57-62, 1985.
- [4] S. A. Franklin and B. J. S. Tucker, "Hot Strength and Thermal Shock Resistance of Magnesia-Carbon Refractory", Transactions and Journal of the British Ceramic Society, Vol. 94-4, pp. 151-156, 1995.
- [5] P. H. R. B. Lemon, "Phenol Formaldehyde Polymers for the Bonding of Refractories", Transactions and Journal of the British Ceramic Society, Vol. 84, pp. 53-57, 1985.

۶- پی‌نوشت

1- Dead Burn