

تأثیر اندازه دانه های منیزیا بر سینتیک اکسیداسیون دیرگدازهای منیزیا-گرافیتی در دماهای مختلف

سارا مهشید ، بابک هاشمی ، سید خطیب الاسلام صدرنژاد ، زیارتعلی نعمتی

دانشکده مهندسی و علم مواد ، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده: در این مقاله، سینتیک اکسیداسیون آجر دیرگداز منیزیا-گرافیت باند رزینی، محتوی ۱۵٪ گرافیت، ۸۵٪ منیزیا و ۵٪ رزین فنولیک در دماهای ۸۰۰، ۹۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد و در حضور اکسیژن هوا مطالعه و تأثیر توزیع دانه بندی منیزیا در سه ضریب توزیع آندریازن ۰،۳، ۰،۵ و ۰،۷ بررسی شد. با استفاده از یک نرم افزار سینتیکی طراحی شده برای واکنشهای گاز-جامد و استفاده از مدل هسته کوچک شونده، مکانیزم واکنش اکسیداسیون در هر دما تعیین و پارامترهای سینتیکی مربوطه محاسبه شد. همچنین انرژی تحریک واکنش دیفوزیون گاز با رسم رابطه آرینوسی ضریب نفوذ بر حسب دما برای هر یک از ضرایب مورد آزمایش بدست آمد. به منظور بررسی تأثیر ضرایب توزیع بر سرعت واکنش اکسیداسیون، از نتایج آزمایش چگالی و تخلخل و ارتباط آن با ضریب نفوذ گاز و همچنین مقایسه کاهش وزن نمونه ها در یک زمان معین، استفاده شد. این نتایج نشان می دهد که با افزایش ضریب توزیع، کاهش وزن ناشی از سوختن گرافیت کمتر شده و در نتیجه سرعت اکسیداسیون کاهش می یابد.

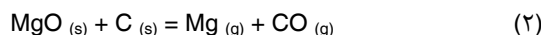
کلمات کلیدی: اکسیداسیون، مکانیزم، سینتیک، دیرگداز منیزیا-گرافیت، کاهش وزن، اندازه دانه،

۱- مقدمه

دیرگدازهای منیزیا-گرافیتی جایگاه ویژه ای در صنایع تولید فولاد دارند و در بسیاری از فرآیندهای تولید و تصفیه فلزات نظیر BOF (Basic Oxygen Furnace) ، EAF (Electric Arc Furnace) و انواع مختلف پاتیل کاربرد دارند. افزودن گرافیت به MgO باعث ایجاد خواص ویژه ای مانند مقاومت بالا به شوک حرارتی (به دلیل کاهش ضریب انبساط حرارتی و افزایش هدایت حرارتی) و افزایش مقاومت به خوردگی (به دلیل کاهش ترشدهای) می شود. علی رغم این مزایا، اکسیداسیون دما بالای گرافیت که منجر به تغییر خواص این آجرها در حین کار می شود، عمده ترین ضعف دیرگدازهای محتوی کربن است. در کوره های BOF، اکسیداسیون توسط هوا در دماها و قسمتهای مختلف سیستم روی می دهد. با وجود این، شدت اکسیداسیون در دماغه کوره (nose area)، به دلیل تغییرات وسیع دما که ناشی از نوسانات حرارتی می باشد، قابل توجه است. همچنین، به هنگام شارژ کوره و تعمیرات گرم، آستر دیرگداز در تماس مستقیم با اکسیژن هوا قرار می گیرد. به طور کلی اکسیداسیون کربن در آجرهای MgO-C از طریق دو مکانیزم عمده انجام می گیرد. اکسیداسیون مستقیم کربن با اکسیژن:



اکسیداسیون غیرمستقیم کربن که توسط واکنش کربن با اکسیژن موجود در MgO جامد انجام می شود:



احیای منیزیا (واکنش ۲) در دماهای بالای ۱۴۰۰ °C اهمیت پیدا می کند، درحالیکه واکنش (۱) مکانیزم عمده اکسیداسیون در دماهای پایین تر از ۱۴۰۰ °C است.^[۱]

اگرچه در چند دهه اخیر، مطالعات بسیاری بر روی دیرگدازهای منیزیا-گرافیتی انجام گرفته و نقش عوامل مختلف از قبیل اندازه دانه های MgO و میزان گرافیت مصرفی، در خواص فیزیکی و شیمیایی آنها مورد بررسی قرار گرفته است،^[۲-۶] اما در زمینه بررسی های سینتیکی اکسیداسیون این مواد و عوامل موثر بر آن مطالعات اندکی انجام شده است. Carniglia و Tabata بررسی هایی بر روی واکنش MgO و C در محدوده دمایی بالای ۱۴۰۰ °C و فشار اکسیژن پایین انجام داده اند^[۸،۷]. Ichikawa و همکارانش سینتیک اکسیداسیون مستقیم کربن در آجرهای MgO-C را بررسی کردند، اما معادله سرعت ارائه شده توسط آنها تنها با اندازه گیریهای انجام شده در دمای ۱۰۰۰ °C بدست آمده است.^[۹] در سالهای اخیر مطالعات عمیق تری بر روی سینتیک اکسیداسیون این آجرها انجام گرفته و معادلاتی برای آن ارائه شده است. Ghosh و همکارانش با بررسی اکسیداسیون آجرهای MgO-C از طریق اندازه گیری کاهش وزن ایزوترمال نمونه ها در محدوده دمایی ۸۰۰-۱۶۰۰ °C، مکانیزم سوختن کربن در این آجرها را بررسی کردند.^[۱۰] در کاری که توسط Faghihi-Sani انجام

گرفت، یک مدل ریاضی برای سینتیک اکسیداسیون مستقیم گرافیت در محدوده دمایی °C ۱۲۰۰-۱۰۰۰، از طریق اندازه گیری کاهش وزن نمونه ها در حین سوختن کربن ارائه شد و پارامترهای سینتیکی مربوطه در این محدوده دمایی بدست آمد. علاوه بر این، انرژی تحریک واکنش در کنترل نفوذی و شیمیایی به ترتیب $49,47 \text{ kJ/mol}$ و $46,63 \text{ kJ/mol}$ گزارش شد^[۱۱]. در مطالعه ای که توسط Rigaud و Xiangmi انجام گرفته، اکسیداسیون مستقیم کربن در محدوده دمایی °C ۱۴۰۰-۱۰۰۰ بررسی شده و معادله سرعت سوختن کربن به روش آنالیز گاز خروجی و اندازه گیری مقدار CO تبدیل شده به CO₂ به عنوان تابعی از زمان اکسیداسیون بدست آمد. همچنین انرژی تحریک واکنش در کنترل نفوذی $48,46 \text{ kJ/mol}$ گزارش شد^[۱۲]. در داخل کشور نیز در سالهای اخیر بررسی هایی توسط دکتر نعمتی و همکارانش صورت گرفته است^[۱۳].

در مقاله حاضر نیز سینتیک اکسیداسیون دیرگدازهای منیزیا-گرافیتی در محدوده دمایی °C ۱۲۵۰-۸۰۰، از طریق کاهش وزن متوالی نمونه ها مطالعه شد و با کمک یک نرم افزار کامپیوتری که براساس مدل سینتیکی گاز-جامد طراحی شده است^[۱۴]، مکانیزم واکنش و پارامترهای سینتیکی مربوطه در این محدوده دمایی بدست آمد، همچنین اثر توزیع دانه بندی MgO بر مقاومت اکسیداسیونی این آجرها بررسی شد.

۲- فعالیت‌های عملی

۱-۲- آماده سازی

به منظور ساخت نمونه های استوانه ای شکل به قطر ۳۰ mm و ارتفاع ۲۵ mm از ۸۵٪ منیزیای زینتر شده چینی با خلوص ۹۷٪، ماکزیمم اندازه دانه ۵ mm و چگالی بالک $3,51 \text{ g/cm}^3$ ، ۱۵٪ گرافیت پولکی چینی با دانه بندی ثابت و ۵٪ رزین فنولیک استفاده شده است. آنالیز شیمیایی منیزیا و خاکسترگرافیت در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. به منظور بررسی تاثیر دانه بندی بر اکسیداسیون نمونه ها، سه ضریب توزیع ۰,۳، ۰,۵، ۰,۷، مطابق با فرمول آندریازن انتخاب و توزیع دانه بندی MgO، مطابق با هر یک از این ضرایب با کمک فرمول آندریازن بدست آمد^[۴-۲]. (جدول ۳)

$$Y = 100 * (d/D)^n \quad (3)$$

Y: درصد وزنی ذراتی که سایز کمتر از d دارند

D: ماکزیمم اندازه ذرات موجود در پودر (mm)

n: ضریب توزیع آندریازن که در محدوده 0-1 می باشد

جدول ۱- آنالیز شیمیایی منیزیای زینتر شده چینی

ترکیب	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	L.O.I
درصد	۹۷,۱	۱,۲۶	۰,۵۶	۰,۰۹	۰,۸۹	۰,۰۱

جدول ۲- آنالیز شیمیایی خاکسترگرافیت

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
درصد	۵۰,۲۰	۱۷,۱۰	۷,۶۷	۵,۰۶	۰,۷۹	۱,۳۷	۱۷,۸۱

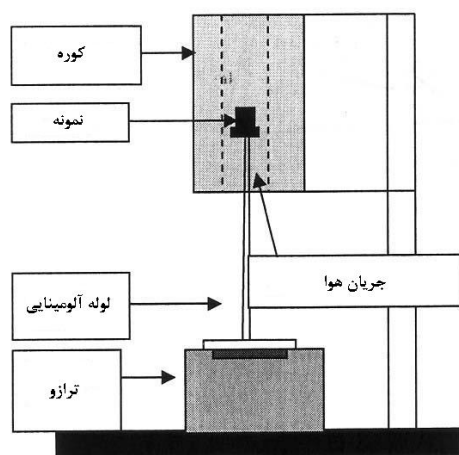
جدول ۳- مواد اولیه مورد استفاده در نمونه ها

مواد اولیه	درصد وزنی			دانه بندی (mm)
	n=۰,۳	n=۰,۵	n=۰,۷	
منیزیای زینتر شده	۱۲,۰۷	۱۹,۱۶	۲۵,۵	۳-۵
	۸,۳۳	۱۲,۰۸	۱۴,۷۰	۲-۳
	۱۲,۱۶	۱۵,۷۵	۱۷,۲۶	۱-۲
	۲۶,۱۸	۲۶,۰۸	۲۲,۰۲	۰,۱-۱
	۲۶,۲۶	۱۲,۰۲	۵,۵۳	۰,۱<
	%۸۵	%۸۵	%۸۵	
گرافیت پولکی	%۱۵			ثابت
رزین فنولیک	%۵			—

نمونه های استوانه ای شکل به روش پرس هیدرولیک یک جهته با فشار ۱۲۰ Mpa ساخته شده و در دو مرحله تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. مرحله اول در دمای ۲۴۰ C° و اتمسفر هوا، به مدت ۲۴ ساعت و مرحله دوم در محیط احیایی کربن و دمای ۶۰۰ C° به مدت ۷ ساعت انجام گرفت. نمونه ها پس از هر مرحله عملیات حرارتی به مدت ۲۴ ساعت در نفت خام قرار گرفته و سپس چگالی و تخلخل محاسبه گردید.

۳- آزمایش اکسیداسیون

روشی که در این آزمایش به آن استناد شد، اندازه گیری کاهش وزن تناوبی نمونه در دمای ثابت و در مدت ۹۰ دقیقه می باشد که در دماهای ۸۰۰، ۹۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد، با استفاده از یک کوره الکتریکی استوانه ای شکل (قطر داخلی ۴۵ cm و ارتفاع ۴۵ cm) و ترازوی دیجیتالی انجام گرفت. ترازو به فاصله ۰,۵ mm در زیر کوره قرار داشته و نمونه توسط یک پایه آلومینایی که بر روی آن قرار دارد به داخل کوره فرستاده می شود (شکل ۱). به منظور انجام اکسیداسیون یک جهته (جهت X) دو انتهای نمونه توسط یک صفحه آلومینایی پوشیده می شود. تغییرات وزن نمونه با کمک ترازو اندازه گیری شد و کاهش وزن تناسبی مطابق با فرمول زیر بدست آمد:



شکل ۱- دستگاه آزمایش اکسیداسیون در آزمایشگاه

۴- نتایج و بحث

سطح مقطع نمونه ها پس از اکسیداسیون، نشان دهنده یک منطقه اکسید نشده در وسط بود که به طور کامل از لایه اکسید اطراف خود جدا شده است به طوریکه هیچ گونه تغییر ابعادی در نمونه مشاهده نمی شود. حضور یک مرز مشخص بین دو لایه بیانگر این موضوع است که هیچ گونه نفوذ اکسیژن در لایه اکسید نشده وجود نداشته است و این بدلیل واکنش پذیری بالای گرافیت در سطح واکنش است. بنابراین، از یک مدل واکنش گاز- جامد که در آن ابعاد اولیه نمونه در حین واکنش تغییر نمی کند، استفاده شد [۱۶،۱۵]. در این مدل (شکل ۲)، سه مکانیزم نفوذ خارجی یا انتقال جرم در لایه گاز اطراف نمونه با زمان t_{ext} ، نفوذ گاز در لایه اکسید شده یا نفوذ داخلی با زمان t_{dif} و واکنش شیمیایی در سطح واکنش با زمان t_{che} دخالت داشته که یکی و یا ترکیبی از آنها کنترل کننده واکنش گاز- جامد می باشند و زمان کل واکنش با توجه به مکانیزم یا مکانیزمهای کنترل کننده آن با استفاده از معادله ۴ بدست می آید:

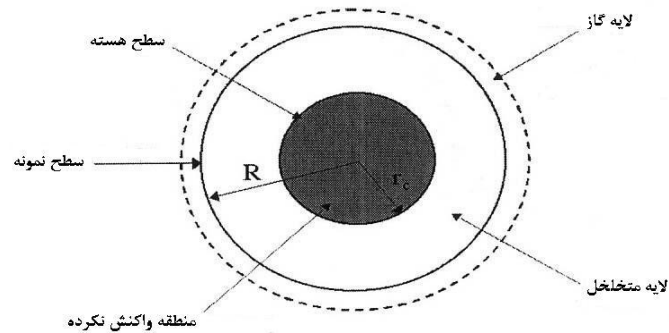
$$t = \tau_{che} \times f_{che}(x) + \tau_{dif} \times f_{dif}(x) + \tau_{ext} \times f_{ext}(x) \quad (4)$$

که در آن T زمان اتمام واکنش مطابق با هریک از مکانیزم های ذکر شده و f تابعی از کاهش وزن نسبی (x) می باشد که به صورت مقابل تعریف می شود [۱۶،۱۵].

$$f_{ext}(x) = x$$

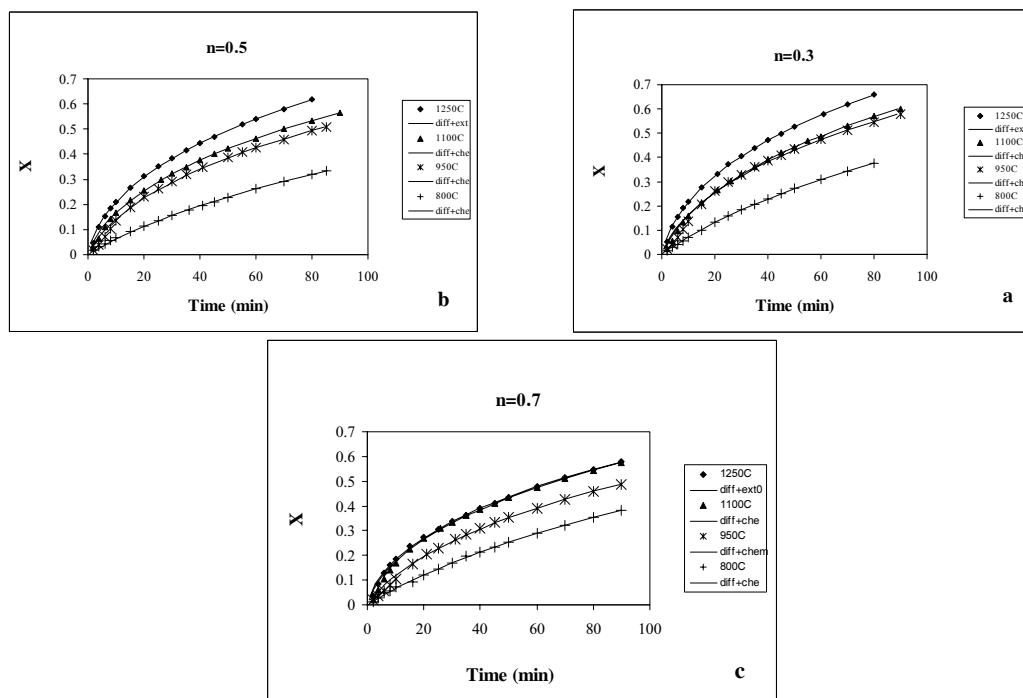
$$f_{che}(x) = 1 - \sqrt{1 - x}$$

$$f_{dif}(x) = x + (1 - x) \times \ln(1 - x)$$



شکل ۲- لایه های مختلف اطراف یک نمونه کروی پس از آزمایش اکسیداسیون

با کمک نرم افزار کامپیوتری و رسم کاهش وزن نسبی (X) برحسب زمان می توان زمان تکمیل واکنش و مکانیزم کنترل کننده آن را بدست آورد^[۱۴]. این نتایج در نمودار های ۳a تا ۳c نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، سرعت کاهش وزن از دمای ۸۰۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد در هر سه نمودار در حال افزایش است. خطوط منطبق شده بر نتایج تجربی نشان دهنده مکانیزم تشخیص داده شده توسط نرم افزار است.



شکل ۳- کاهش وزن بر حسب زمان برای توزیع آندریازن (a) ۰.۳، (b) ۰.۵ و (c) ۰.۷ در دماهای آزمایش.

با استفاده از ضرایب T بدست آمده توسط نرم افزار و فرمول های ارائه شده برای مدل استوانه ای می توان ضرایب سینتیکی مربوط در هر دما را بدست آورد. این اطلاعات در جدول ۴ نشان داده شده است. ضریب نفوذ موثر (D_e)، ضریب انتقال جرم (k_g) و ثابت واکنش شیمیایی (K_s) از طریق روابط زیر به T مربوطه وابسته هستند^[۱۵]:

$$T_{dif} = (\rho_m R^2)/(8C_{O_2}D_e)$$

$$T_{ext} = (\rho_m R)/(4C_{O_2}k_g)$$

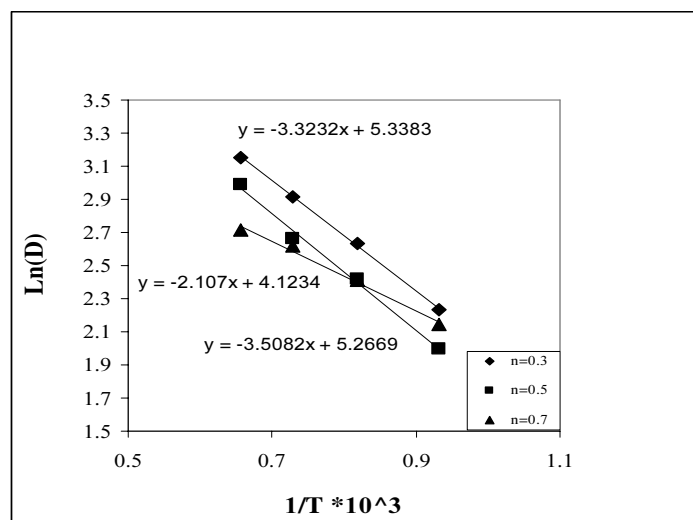
$$T_{che} = (\rho_m R)/(2C_{O_2}K_s)$$

که در آن ρ_m دانسیته مولی گرافیت در نمونه ها، R شعاع اولیه نمونه، C_{O_2} غلظت اکسیژن در سطح نمونه (mol/cm^3) و D_e ، k_g و K_s به ترتیب ضریب نفوذ موثر، ضریب انتقال جرم و ثابت تعادل شیمیایی می باشند.

جدول ۴- پارامترهای سینتیکی محاسبه شده در دماهای مختلف

ضرب آندریازن	T(°K)	T _{diff}	T _{che}	T _{ext}	D _e (cm ² /min)	k _s (cm/min)	k _g (cm/min)
۰.۳	۱۲۲۳	۳۰۸,۹۲۹۶	۶۵,۶۹۸۳	-	۱۳,۹۷۱۳	۱۷۵,۱۹۰۵	-
۰.۳	۱۳۷۳	۲۶۲,۲۲۲۶	۷۶,۴۶۵۰	-	۴۷۸۷.۱۸	۱۶۸,۹۸۴۲	-
۰.۳	۱۵۲۳	۲۳۰,۱۶۹۵	-	۱۹,۳۸۰۰	۲۳,۴۵۱۹	-	۳۶۹,۷۸۷۱
۰.۳	۱۰۷۳	۳۳۸,۶۶۶۱	۲۴۹,۵۶۳۴	-	۱۱,۱۱۴۳	۴۰,۶۱۸۰	-
۰.۷	۱۲۲۳	۳۸۶,۴۴۵۷	۱۱۷,۰۸۳۵	-	۱۱,۵۱۱۲	۱۰۱,۳۱۶۶	-
۰.۷	۱۳۷۳	۳۵۱,۱۵۳۶	۴۵,۵۳۵۳	-	۱۴,۲۲۱۸	۲۹۲,۴۶۳۹	-
۰.۷	۱۵۲۳	۳۶۶,۸۴۷۵	-	۱۹,۴۵۳۷	۱۵,۱۵۶۸	-	۳۸۱,۰۸۹۴
۰.۷	۱۰۷۳	۲۷۸,۷۲	۲۷۲,۵۸۰۲	-	۱۰,۲۶۷۰	۳۸,۰۳۹۸	-
۰.۵	۱۲۲۳	۳۷۸,۱۶۳	۸۱,۳۰۲۷	-	۱۱,۷۶۳۳	۱۴۵,۹۰۵۵	-
۰.۵	۱۳۷۳	۳۴۸,۳۷۸۱	۵۵,۶۲۵۲	-	۱۴,۳۳۵۱	۲۳۹,۴۱۳۹	-
۰.۵	۱۵۲۳	۲۷۷,۸۲۱۹	-	۱۶,۸۶۰۰	۱۹,۹۳۹۵	-	۴۳۸,۰۸۵۱
۰.۵	۱۰۷۳	۵۲۹,۸۱۹۶	۲۸۴,۵۱۸۹	-	۷,۳۶۶۴	۳۶,۵۷۹۶	-

با توجه به رابطه آرنیوسی ضریب نفوذ با دما و رسم $\ln(D)$ بر حسب $1/T$ ، انرژی تحریک واکنش ($-\Delta H$) بدست خواهد آمد [۱۲و۱۱].
(شکل ۴)



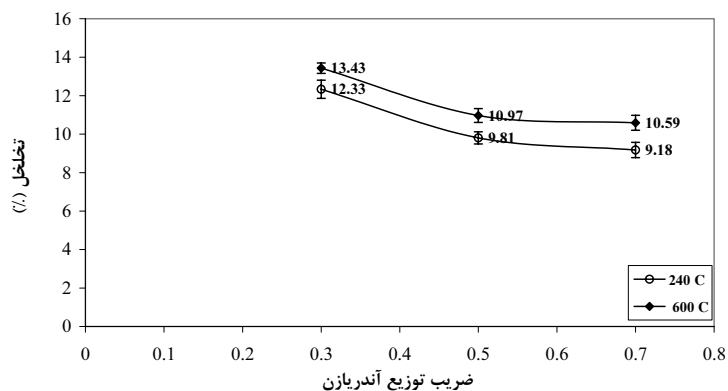
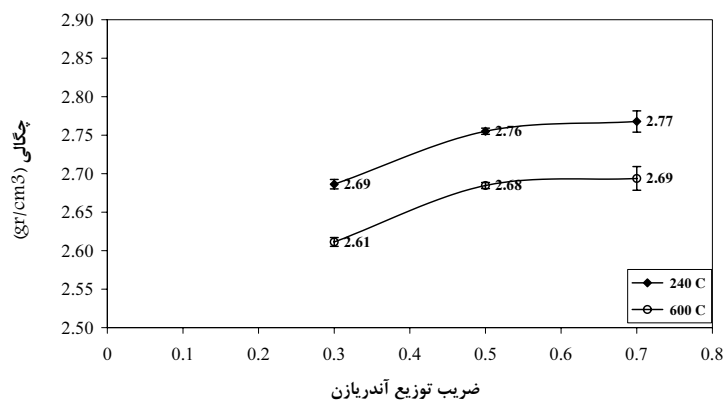
شکل ۴- رسم آرنیوسی ضریب نفوذ بر حسب معکوس دمای مطلق.

شیب نمودار $\ln(D)$ بر حسب $1/T$ معادل $(\Delta H/R)$ می باشد. بنابراین، انرژی تحریک واکنش مطابق با جدول ۵ گزارش میشود.

جدول ۵- انرژی اکتیواسیون واکنش نفوذ در لایه اکسید شده برای نمونه ها با ضریب توزیع متفاوت برای دانه بندی MgO

ضریب توزیع آندریازن	۰.۳	۰.۵	۰.۷
ΔH (kJ/mol)	۲۷,۶۳	۲۹,۱۷	۱۷,۵۲

به منظور بررسی تاثیر توزیع اندازه دانه در اکسیداسیون، از نتایج آزمایش چگالی (بالک) و تخلخل (ظاهری) استفاده شده است. شکل ۵ میانگین چگالی و تخلخل نمونه ها را در هر ضریب توزیع انتخابی بعد از حرارت دهی در دماهای ۲۴۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش ضریب آندریازن درصد تخلخل نمونه ها کاهش و به تبع آن چگالی افزایش یافته است. به طور کلی در نمونه های سرامیکی با افزایش میزان ذرات ریز، تخلخل های موجود در بدنه توسط این ذرات پر شده و در نتیجه نمونه متراکم تر خواهد شد. اما، در بدنه های حاوی گرافیت، ذرات ریز در فضاهای بین پولکهای گرافیت قرار گرفته و باعث جدایش آنها از هم و افزایش تخلخل نمونه می شوند. با بزرگ شدن ضریب آندریازن و کاهش ذرات ریز در بدنه، پولکهای گرافیت از یکدیگر جدا شده بلکه در فواصل بین ذرات درشت تر تجمع یافته و باعث تراکم نمونه می شوند. اما با افزایش n از ۰.۵ تا ۰.۷، تغییر چندانی در دانسیته و تخلخل نمونه ها مشاهده نمی شود که این مطابق با نتایج دیگران نیز می باشد [۱۵].



شکل ۵- نمودار چگالی بالک و درصد تخلخل ظاهری برحسب ضریب آندریازن

درصد تخلخل و دانسیته بر روی میزان کاهش وزن نمونه ها تاثیر زیادی دارد. این پارامتر از طریق معادله زیر با ضریب دیفیوژن و از طریق آن با میزان کاهش وزن ارتباط پیدا می کند:^[۱۷]

$$D_e = D_{O_2-CO} \cdot \epsilon \cdot \gamma$$

D_{O_2-CO} : نفوذ مولکولی اکسیژن در CO

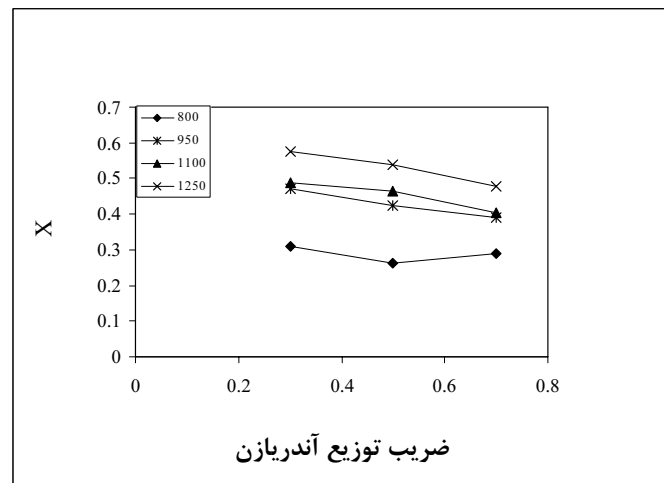
ϵ : میزان تخلخل لایه اکسید شده

γ : فاکتور مربوط به شکل تخلخل ها

میزان تخلخل لایه اکسید شده به درصد تخلخل اولیه نمونه و میزان گرافیت اکسید شده بستگی دارد. بنابراین، می توان انتظار داشت که با افزایش میزان تخلخل های اولیه در نمونه، نفوذ اکسیژن در آن راحت تر صورت گرفته و به دنبال آن کاهش وزن بیشتری مشاهده شود.

شکل ۶ میزان کاهش وزن ناشی از اکسیداسیون نمونه ها را بعد از یک ساعت نشان می دهد.

همانطور که مشاهده می شود، نمونه های با تخلخل بالا کاهش وزن بیشتری در حین اکسیداسیون نشان می دهند. اما این امر در دماهای بالا که عموماً مکانیزم نفوذ گاز کنترل کننده سرعت واکنش می باشد، بیشتر مشهود است. به طور کلی گرافیت از دمای ۶۰۰ الی ۷۰۰ درجه سانتی گراد شروع به سوختن می کند. بنابراین، در دماهای پایین مانند ۸۰۰ درجه سانتیگراد واکنش شیمیایی کنترل کننده سرعت واکنش بوده و درصد تخلخل به میزان کمتری در واکنش تاثیرگذار می باشد. به همین دلیل در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد، تغییر ضریب توزیع آندریازن و به دنبال آن دانسیته و تخلخل نمونه ها تاثیر چندانی در کاهش وزن ناشی از سوختن نخواهد داشت. اما با وجود این، روند افزایش کاهش وزن با کوچک شدن ضریب آندریازن و در نتیجه افزایش تخلخل در نمودار حفظ شده است، زیرا با توجه به مکانیزم نفوذ که در همه دماها نقش دارد، این روند منطقی می باشد. البته، لازم به ذکر است که با توجه به معادله ۱۱ علاوه بر میزان تخلخل، اندازه و شکل تخلخل ها نیز در میزان نفوذ گاز موثر می باشد. تخلخل های ریز در بدنه نفوذ گاز به داخل آن را سخت تر کرده و در نتیجه سرعت اکسیداسیون کاهش می یابد و حال آنکه وجود تخلخل های درشت باعث افزایش سرعت می شود. بنابراین، فاکتور اندازه و میزان تخلخل ها را باید توأم در نظر گرفت. در این آزمایش به دلیل کمبود امکانات این فاکتور اندازه گیری نشده و لذا این نتایج با فرض ثابت بودن γ ارائه شده است.



شکل ۶- مقایسه کاهش وزن نمونه ها بعد از یک ساعت، بر حسب ضرایب توزیع مختلف

۵- نتیجه گیری

۱- در این آزمایش با استفاده از یک نرم افزار کامپیوتری، مکانیزم واکنش اکسیداسیون گرافیت در دماهای ۸۰۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد برای سه ضریب توزیع آندریازن تعیین و پارامترهای سینتیکی مربوطه محاسبه شد. با توجه به اطلاعات بدست آمده مکانیزم غالب در این واکنش ها ترکیب دو مکانیزم واکنش شیمیایی و نفوذ گاز برای دماهای ۸۰۰، ۹۵۰ و ۱۱۰۰ و مکانیزم نفوذ خارجی و داخلی برای دمای ۱۲۵۰ درجه می باشد.

۲- برای بررسی صحت مدل " هسته کوچک شونده " تایید شد.

۳- با افزایش ضریب آندریازن و کاهش تخلخل، میزان کاهش وزن و در نتیجه سرعت اکسیداسیون کاهش می یابد.

مراجع

1. M.Rigaud, X.Li, P.Bombard & B.Gueroult, "Oxidation Resistance of Carbon-Bonded Basic Refractory Compositions", in proceeding of the 75th steelmaking conference of the Iron & Steel society of the AIME (Toronto, Canada, 1992). AIME, New York, 1992, 307-15
2. M.Subbanna, P.C.Kapor, Pradio " Role of powder size, packing, solid loading & dispersion in colloidal processing of ceramics ", Ceramic International 28 (2002) 401-405
3. M.Suzuki, H.Sato, M.Hasegawa, M.Hirota "Effect of size distribution on tapping properties of fine powders", Powder Technology 118 (2001) 53-57
4. جواد نجف آبادی فراهانی، جعفر جوادپور، واهاک مارقوسیان، نادر خلیلی " تاثیر پارامترهای فرآیند بر ریزساختار و خواص نسوزهای آلومینا- گرافیتی باند رزینی "، چهارمین کنگره سرامیک ایران، اردیبهشت ۱۳۸۱، صفحه ۴۲
5. N.C. Lubaba, B. Rand & N.H. Brett "Compaction studies of MgO-Flake graphite mixtures relevant to the fabrication of composite refractory materials", British Ceramic Transaction 87 (1988) 158-163
6. N.C. Lubaba, B. Rand & N.H. Brett "Microstructure and strength of MgO-Carbon Composite Refractory Materials", British Ceramic Transaction 88 (1989) 47-54
7. S.C. Carniglia, "Limitation on Internal Oxidation-Reduction Reaction in BOF Refractories", American Ceramic Society Bulletin, 52 [2] (1973) 160-65
8. K.Tabata, H.Nishio & K.Itoh, "A study on Oxidation-Reduction Reaction in MgO-C Refractories" Taikabutsu Overseas, 8 [4] (1988) 3-10
9. K. Ichikawa, H. Nishio & Y. Hoshiyama, "Oxidation Test of MgO-C Briks" Taikabutsu Overseas, 14 [1] (1994) 13-19
10. N.K. Ghosh, D.N. Ghosh & K.P. Jagannatha "Oxidation mechanism of MgO-C in air at various temoeratures" , British Ceramic Transaction, Vol.99 No.3 2000, 142-8
11. Mohammad-Ali Faghihi-Sani, Akira Yamagyshi "Oxidation kinetics of MgO-C refractory bricks " Ceramic International 28 (2002) 835-839
12. Xiangmin Li, Michel Rigaud & Stefan Palco "Oxidation kinetics of graphite phase in MgO-C refractories" Journal of American ceramic Society, 78 [4] (1995) 965-71
13. B. Hashemi, Z.Ali Nematı and S.K.Sadrnezhad "Oxidation Mechanisms in MgO-C Refractories", China

-
- Refractories, Vol.13, No.2, 2004, 13-20
14. B.Hashemi, Z. Moghimi, Z.A. Nemati & S.K. Sadrnezhad "Solid-Gas reactions in MgO-C refractories", 4th ISARIM-Symposium on Refractories, MET Society, Hamilton- Canada, 2004, 581-91
 15. N. Mazet & B. Spinner, "Modeling of gas-solid reactions 2. porous solids", International Chemical Engineering, Vol.32, No.2, 1992, 271-84
 16. O.Levenspiel "Chemical reaction Engineering", 2nd Ed. John Wiley, 1972
 17. R.W.Missen and C.A. Mims "Introduction to chemical reaction engineering and kinetics" John Wiley and Sons's Inc., New York, 1999, pp.224-236.