

Effects of Carbonates, Carbon, Chromium Oxide and SiC Compositions on Steel Slag Sintering*

Research Article

Aida Faeghinia¹

Hossein Mardi²

1- Introduction

This paper investigated the effect of the presence of several carbonate and chromium oxide carbonate agents with different weight percentages on the physical and chemical properties of related glass and slag composites. The effect of the mentioned foaming agents on the density, porosity and expansion are compared. Finally, the crystallization, microstructure and mechanical strength of the samples that were suitable in terms of microstructure and density were measured and compared. The purpose of the work was to use steel slag waste for use as insulation construction materials.

2-Experimental Procedure

First, two compositions of window glass and steel slag were crushed. Since the primary slag powder was non-uniform and structurally heterogenic, to ensure the uniformity of the composition, the slag was melted at 1450 °C, and its frit was prepared. The resulting frit was ground in an agate mill and dried at 110 °C and finally ground with an electric mortar for 45 minutes. Two glass powders and amorphous slag powder were mixed with equal weight ratio. Samples were prepared in the form of tablets with a radius of 2 cm and a thickness of 3-4 mm using automatic uniaxial hydraulic press at 100 MPa pressure. Carboxymethylcellulose CMC 2 wt.% was used to increase adhesion and increase crude strength. Five types of foaming agents include: silicon carbide (SiC), calcium carbonate (CaCO₃), barium carbonate (BaCO₃), chromium oxide (Cr₂O₃) with different weight percent, 1 part by weight of graphite as a reducing agent, as well as graphite itself, separately were used. The changes were examined in terms of density, porosity and phases. All the added foams, including five different amounts of 1, 2, 3, 4 and 5 parts by weight, were added to the composition.

3-Results and Discussion

Figure 1 shows a graph of total density changes, increasing the amount of foaming agent from 1 to 5 by weight. As the amount of calcium carbonate and barium carbonates increase, the density decreases with a gentle slope. As the sintered glass gradually softens, under heating, calcium or sodium carbonate particles decompose to oxide, releasing carbon dioxide.

The opposite is true in the case of Cr₂O₃ and SiC. As the amount of these compounds increases, it seems that

the increase in volume is disturbed and the density increases.

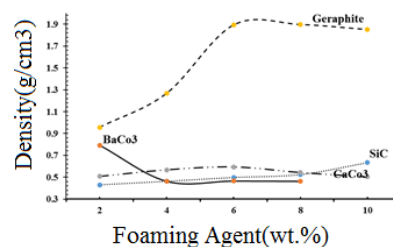


Figure 1. Changes of total density of composite, with increasing the amount of barium and calcium carbonate foaming agents and chromium oxide and silicon carbide from 1 to 5 parts by weight

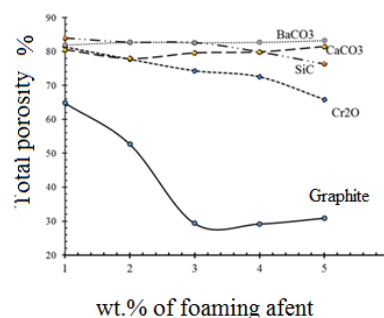


Figure 2: Changes in overall porosity of composite, with increasing the amount of barium and calcium carbonates foaming agents and chromium oxide and silicon carbide from 1 to 5 parts by weight

The lowest density is related to BaCO₃ containing samples, which is 0.42 g/cm³ at 5% by weight of this foam. The highest density is 1.89 g/cm³, and it is related to the sample containing 4 weight parts of graphite, excluding graphite compounds, the density is 0.91 g/cm³ and it is related to the samples containing Cr₂O₃.

Although the expansion did not increase as the BaCO₃ level increased (Figure 3), the decomposed foam was removed from the sample as it reached the surface. In fact, it can be said that by adding more than 2 wt. %, the volume does not increase much and the excess gases that are produced are removed from the sample and leave penetrating porosity. The increase in this type of pores is more evident with the increase in the amount of BaCO₃ (Figure 3).

It is noteworthy that due to the high heating rate, BaCO₃ decomposes rapidly and causes deep cracks, especially in A sample.

Because calcium carbonate is a foaming agent, it produces gas. As temperature increases, a significant portion of that compound decomposes. Resultant CaO from the decomposition of calcium carbonate can reduce the viscosity of molten glass. As a result, the volume increase

* Manuscript received: 20 November 2021; Revised, 26 December 2021, Accepted, 6 February 2022.

¹ Corresponding Author, Associate Professor, Ceramic division, Materials and Energy Research Center, Tehran, Iran.

Email : a.faeghinia@merc.ac.ir.

² M.S student, Ceramic division, Materials and Energy Research Center, Tehran, Iran.

in the presence of calcium carbonate (Figure 3). The sample volume increased in graphite containing foams at about 800 ° C.



Figure 3: Images of the composite sample containing carbonate and carbon

4- Conclusion

Glassy foams were produced at 1200 ° C by adding glass waste to slag at a range of 50 wt. % in the presence of different foaming agents: calcium carbonate, carbon, chromium oxide, silicon carbide, and barium carbonate. Sample containing 1% by weight of calcium carbonate with porosity 80% had compressive strength of 4.8 MPa. Sample with 1% of chromium oxide with porosity 82% by weight had compressive strength of 3.2 MPa. Sample with 1% by weight of silicon carbide with porosity 83% had a compressive strength of 2.5 MPa.

تأثیر ترکیبات کربناتی و کربن اکسید کروم و SiC در پخت سرباره فولاد*

مقاله پژوهشی

آیدا فایقی نیا^(۱)حسین مردی^(۲)

چکیده در کار حاضر، سرباره شیشه ای کوره قوس الکتریک شرکت فولاد مبارکه، و ضایعات شیشه سودالایم فلوت شیشه پنجره، با نسبت وزنی مساوی مخلوط شد و این ترکیب پایه به همراه عوامل فوم زای متعدد پخت شد. پنج نوع عامل فوم زای، شامل کاربید سیلیسیم، کربنات کلسیم، اکسید کروم، گرافیت و کربنات باریم در پنج قسمت وزنی به ترکیب پایه اضافه گردید، کل مخلوط های کامپوزیتی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد با سرعت ۱۰ درجه بر دقیقه و زمان ماندگاری سه دقیقه پخت شد. فاز کریستالی متبلور شده در کامپوزیت ها با درصد وزنی کم عامل فوم زای، فاز وولاستونیت و با افزایش درصد وزنی عامل فوم زای تا ۵٪ وزنی فاز شبه ولاستونیت بود. بیشترین افزایش حجم در کامپوزیت (۲/۵ برابر) مربوط به نمونه با ۵ درصد وزنی کربنات باریم و بیشترین تخلخل (۱۴ درصد) مربوط به کاربید سیلیسیم با ۱ درصد وزنی می باشد. بالاترین استحکام فشاری در بین سه ترکیب تایید شده از لحاظ ریز ساختاری، مربوط به نمونه با یک درصد وزنی کربنات کلسیم بود که ۴/۸ مگا پاسکال به دست آمد. همچنین توزیع تخلخل ها در تمامی کامپوزیت های فوم دار غیر یکنواخت بوده و تنها نمونه اکسید کروم دار توزیع تخلخل بهتری نسبت به سایرین دارد.

واژه های کلیدی کربنات، شیشه-سرامیک، تخلخل، پخت.

مقدمه

اگر نوع عامل فوم زای به درستی انتخاب شده باشد، پس از اینکه جداره های یکنواخت و ویسکوز شیشه تشکیل شدند، فشار گاز حاصل از واکنش فوم زای حجم داخل سلول خود را افزایش می دهد. جمع افزایش حجم این حفرات، منجر به افزایش حجم قطعه، می گردد [6]. تجزیه ی بسیاری از عوامل فوم زای، میزان کمی خاکستر بسیار ریز پراکنده بر جای می گذارد، که می تواند بر برخی از خواص شیشه نظیر ویسکوزیته و تمایل به تبلور اثر بگذارد. عوامل فوم زایی که در کل پذیرفته شده اند، بر اساس نحوه تولید گاز و واکنش، به دو دسته ی مواد های خنثی شامل کربنات هایی همچون Na_2CO_3 و CaCO_3 و BaCO_3 و کاهنده (همچون کربن، SiC، شکر و نشاسته) تقسیم بندی میشوند. در تحقیقات بسیاری از شیشه های پایه متنوعی از جمله شیشه لامپ کاتدی، سودالایم ضایعاتی، سرباره، و خاکستر ذغال سنگ استفاده شده است [7-8] در حین نرم شدن تدریجی شیشه ی زینتر شده، تحت حرارت دهی، ذرات کربنات های کلسیم یا سدیم، به اکسید تجزیه شده و با خروج گاز دی اکسید کربن همراه است. اکسید حاصل از واکنش وارد مذاب شیشه شده و به عنوان عامل دگرگون ساز شیشه عمل کرده، بنابراین ویسکوزیته ی مذاب

فوم، به معنی جرم کفی است، که این کف سبک، متشکل از حباب های ریزی در درون یا در سطح مایع می باشد. در تعریفی دیگر که بیشتر در مورد جامدات صادق می باشد، فوم ماده ای سبک و حفره دار است که در اثر به وجود آمدن حباب های گاز، در فرآیند تولید، تشکیل می گردد [1]. یکی از مناسب ترین گزینه ها برای کاربرد فوم در مواد عایق است [2]، یکی از این فوم ها از نوع فوم شیشه است که طول عمر تقریباً نامحدودی دارد و خواص فیزیکی آن، با زمان، تغییر نمی کند [3]. فوم های شیشه ای، مصالح ساختمانی ای هستند که امروز رقیب عایق های پلیمری و مواد فیبری، برای پوشش حرارتی شده اند. مهمترین رایج ترین روش تولید حال حاضر، روش زینتر پودر شیشه در حضور عوامل فوم زای و افزودنی می باشد [4]. اکثر مواد متخلخل با استفاده از عوامل اسفنجی کننده حاصل می شوند که طی آن بخشی از ماده تجزیه شده و خروج گاز را در پی دارد. از جمله مزایای این روش، امکان تهیه شکل های مختلف می باشد. از طرفی به کمک این روش می توان تخلخل های بسته ی کوچکی را ایجاد کرد که از طریق روش های دیگر امکان پذیر نیست [5].

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۸/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۱/۱۷ می باشد.

Email : a.faeghinia@merc.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه سرامیک، مشهدین دشت، البرز، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه سرامیک، مشهدین دشت، البرز، ایران.

چسبندگی و افزایش استحکام خام استفاده شد. پنج نوع عامل فومزا شامل: کاربید سیلیسیم (SiC)، کربنات کلسیم (CaCO₃)، کربنات باریم (BaCO₃)، اکسید کروم (Cr₂O₃) به همراه ۱ قسمت وزنی گرافیت به عنوان کاهنده، و همچنین خود گرافیت، به صورت جداگانه، به ترکیب پایه افزوده شده، و تغییرات ایجاد شده از نظر دانسیته و تخلخل و فازهای ایجاد شده بررسی گردید. تمام فومزهای افزوده شده، شامل پنج میزان متفاوت ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ قسمت وزنی در ترکیب اضافه شد. دانسیته پودر ترکیب پایه اصلی که برای تمامی نمونه‌های فومزایی انتخاب شد، با استفاده از دستگاه پیکنومتری گازی (Accupyc 1330 v3.00) بر اساس استاندارد (ASTM-D5550) اندازه‌گیری شد. تست برای هر نمونه ۱۰ بار تکرار شده و میانگین اعلام شد. برای اندازه‌گیری دانسیته از روش ارشمیدسی مطابق استاندارد ASTM-C20 استفاده شد.

با کمک داده‌های دانسیته ارشمیدسی و پیکنومتری، و با استفاده از روابط زیر، درصد تخلخل کل، تخلخل باز و بسته و دانسیته نسبی نمونه‌ها محاسبه شدند.

$$\text{وزن خشک} \\ \text{وزن غوطه‌وری} - \text{وزن اشباع} \\ \text{دانسیته} \% \text{ بالک} = \frac{\quad}{\quad} \times 100$$

$$\text{وزن خشک} - \text{وزن اشباع} \\ \text{وزن غوطه‌وری} - \text{وزن اشباع} \\ \% \text{ تخلخل باز} = \frac{\quad}{\quad} \times 100$$

$$\text{دانسیته بالک} \\ \text{دانسیته تئوری} \\ \% \text{ چگالی} \% \text{ نسبی} = \frac{\quad}{\quad} \times 100 \\ \text{تخلخل} \% \text{ باز} - \text{تخلخل} \% \text{ کل} = \text{تخلخل} \% \text{ بسته}$$

برای محاسبه درصد انبساط طولی از رابطه زیر استفاده شد و تغییرات ضخامت به عنوان انبساط طولی در نظر گرفته شد.

$$\text{طول اولیه} - \text{طول ثانویه} \\ \text{طول اولیه} \\ \% \text{ انبساط طولی} = \frac{\quad}{\quad} \times 100$$

با توجه به سطوح ناصاف نمونه‌ها بعد از فومی شدن، برای تعیین ضخامت هر نمونه، ضخامت ۴ نقطه اندازه‌گیری شده و میانگین آن اعلام شده است.

شیشه را تغییر می‌دهد. گاز CO₂ خروجی در شیشه‌ی ویسکوز به دام افتاده و فشار به تدریج افزایش یافته و سبب منبسط شدن مذاب شیشه خواهد شد. سپس در هنگام سرمایش، مذاب شیشه متراکم شده و ساختار حفره داری شکل می‌گیرد. یک شیشه نرم می‌تواند در اثر واکنش فضاهای بین ذره‌ای با یک عامل فوم زای مناسب تبدیل به فوم شود. معمولاً در شیشه‌های نرم بر اثر اکسیداسیون عوامل فوم‌زای حاوی کربن (همچون کربن، SiC، شکر و نشاسته) دی اکسید کربن تولید می‌شود SiC. نیز فوم‌زایی بسیار کاربردی می‌باشد، که محصولات گازی آن CO و CO₂ است.

در این مقاله به بررسی و مقایسه چند عامل فوم‌زای کربناتی و کاربیدی و اکسید کروم با درصد‌های وزنی مختلف بر کامپوزیت شیشه و سرباره پرداخته شده است. اثر این عوامل فوم‌زا بر دانسیته، و تخلخل و انبساط طولی با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت تبلور و ریزساختار و استحکام مکانیکی نمونه‌هایی که از لحاظ ریزساختاری و دانسیته مناسب هستند، اندازه‌گیری و مقایسه شده است. هدف از این کار استفاده از ضایعات سرباره فولاد جهت مصارف در مصالح ساختمانی عایق است که از طرفی ضایعات این صنعت از لحاظ ارزش افزوده مورد مطالعه قرار گیرد از طرفی فوم‌زاهای مختلف به همراه شیشه باطله نیز در کامپوزیت مذکور استفاده شود.

روش تحقیق

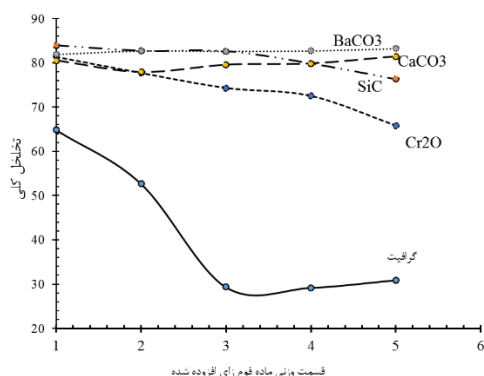
در ابتدا دو ترکیب شیشه ساختمانی و سرباره فولاد تحت عمل خردایش ریز شده و به مش زیر ۱۵۰ رسانده شدند. از آنجایی که پودر سرباره اولیه غیریکنواخت بوده و ناهمگونی ساختاری، و رگه‌های رنگی در ذرات شیشه‌ای آن مشهود بود، لذا برای اطمینان از یکنواختی ترکیب، سرباره در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد ذوب، و فریت آن تهیه شد. فریت حاصل شده پس از قرار گرفتن در خشک‌کن با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد، با استفاده از هاون برقی به مدت ۴۵ دقیقه آسیاب شد. دو پودر شیشه و پودر سرباره آمورف با نسبت وزنی مساوی با هم مخلوط شدند. نمونه‌ها به صورت قرص‌های با شعاع ۲ سانتی متر و ضخامت بین ۳-۴ میلی‌متر با استفاده از پرس هیدرولیک تک محوری اتوماتیک ساخت ایران، با فشار ۱۰۰ مگاپاسکال تهیه شدند. از ۲ درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز CMC برای افزایش

دام افتاده و فشار به تدریج افزایش یافته و سبب منبسط شدن مذاب شیشه خواهد شد. سپس در هنگام سرمایش، مذاب شیشه متراکم شده و ساختار حفره داری شکل می‌گیرد [13].

اما در مورد Cr_2O_3 و SiC برعکس این مطلب صادق است. با افزایش میزان این دو فوم‌زا، به نظر می‌رسد که افزایش حجم مختل شده و دانسیته افزایش یافته است. این موضوع در استفاده از میزان بیشتر گرافیت (شکل ۱) نیز صدق می‌کند و این روند در میزان ۳ قسمت وزنی و بالاتر، بسیار شدیدتر است و حتی باعث کاهش حجم نمونه اولیه و پخت شدن آن شده و از ۱,۲۶ گرم بر سانتی متر مکعب به ۱,۸۹ گرم بر سانتی متر مکعب رسیده است.

کمترین میزان دانسیته مربوط به نمونه‌های فوم‌زای BaCO_3 است، که در میزان ۵ درصد وزنی این فوم‌زا، ۰,۴۲ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. بیشترین میزان دانسیته نیز ۱,۸۹ گرم بر سانتی متر مکعب، و مربوط به نمونه حاوی ۴ قسمت وزنی گرافیت، با در نظر نگرفتن ترکیبات گرافیتی دانسیته، ۰,۹۱ گرم بر سانتی متر مکعب و مربوط به نمونه‌های حاوی Cr_2O_3 می‌باشد که از میزان ۲ قسمت وزنی به بعد، شدیداً افزایش دانسیته داشته است.

در نمودار تخلخل کل (شکل ۲)، روند کلی تغییرات، تقریباً برعکس دانسیته است. بیشترین میزان تخلخل ۸۳ درصد حجمی و مربوط به نمونه ۵ قسمت وزنی BaCO_3 است. کمترین میزان تخلخل هم، ۲۹,۲۰ گرم بر سانتی متر مکعب و مربوط به نمونه شامل ۴ قسمت وزنی گرافیت، ۶۵,۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب، مربوط به نمونه ۵ قسمت وزنی Cr_2O_3 می‌باشد.



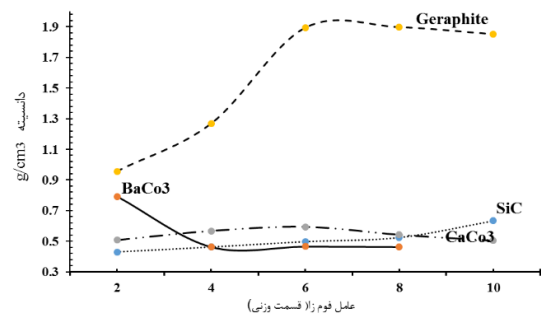
شکل ۲ نمودار تغییرات تخلخل کلی کامپوزیت، با افزایش میزان عامل فوم زای کربنات باریم و کلسیم و اکسید کروم و کاربید سیلیسیوم از ۱ تا ۵ قسمت وزنی

اندازه گیری استحکام فشاری. استحکام فشاری نمونه های زیتر شده بر اساس استاندارد ASTM 04179-889 انجام گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱ cm و ارتفاع ۲ cm توسط اعمال نیروی پرس هیدرولیک شکسته شده و با استفاده از نیروی شکست به دست آمده و با کمک رابطه زیر، استحکام فشاری نمونه‌ها محاسبه گردید.

$$\text{استحکام فشاری} = \frac{\text{نیروی وزن اعمالی}}{\text{سطح مقطع}}$$

نتایج و بحث

در شکل (۱) نمودار تغییرات دانسیته کلی، با افزایش میزان عامل فوم‌زا از ۱ تا ۵ قسمت وزنی، آورده شده است.



شکل ۱ نمودار تغییرات دانسیته کلی کامپوزیت، با افزایش میزان عامل فوم‌زای کربنات باریم و کلسیم و اکسید کروم و کاربید سیلیسیوم از ۱ تا ۵ قسمت وزنی

با افزایش میزان دو فوم‌زای کربنات کلسیم و باریم، دانسیته با شیب ملایمی کاهش یافته و در واقع نزدیک به ثابت است. در حین نرم شدن تدریجی شیشه‌ی زیتر شده، تحت حرارت دهی، ذرات کربنات‌های کلسیم یا سدیم، به اکسید تجزیه شده و با خروج گاز دی‌اکسید کربن همراه است. واکنش تجزیه CaCO_3 را نشان می‌دهد.

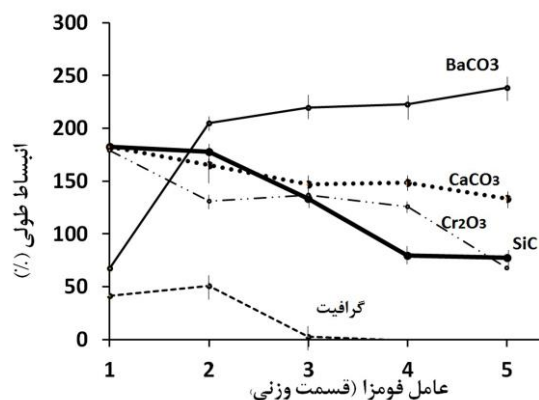


اکسید حاصل از واکنش وارد مذاب شیشه شده و به عنوان عامل دگرگون ساز شیشه عمل کرده، بنابراین ویسکوزیته‌ی مذاب شیشه را تغییر می‌دهد. گاز CO_2 خروجی در شیشه‌ی ویسکوز به

نیز مشاهده می‌شود. اما به طور کلی در مورد نمونه‌های عاری از گرافیت، کمترین میزان انبساط ۶۷ و بیشترین آن ۲۳۸ درصد می‌باشد.

افزایش حجم زیاد، که در نمونه‌های دارای $BaCO_3$ بالای ۲ قسمت وزنی صورت گرفته است، باعث ایجاد ترک‌های انفجار گونه در قطعات شده است (شکل ۴). اگرچه با افزایش میزان $BaCO_3$ ، انبساط چندان افزایش نداشته است، اما فومزای تجزیه شده با راه یافتن به سطح، از نمونه خارج شده است. در واقع می‌توان گفت که با افزودن قسمت‌های وزنی بیشتر از ۲ درصد، حجم چندان افزایش نیافته و مازاد گازهایی که تولید می‌شوند، از نمونه خارج شده و تخلخل نافذ (راه به در) باقی می‌گذارند [6]. افزایش این نوع حفره‌ها با افزایش مقدار $BaCO_3$ در تصاویری که از ظاهر نمونه‌ها در شکل (۴) آورده شده است، مشهود است.

شکل (۳) نیز مقایسه انبساط طولی نمونه‌ها است.



شکل ۳ نمودار تغییرات انبساط کلی کامپوزیت، با افزایش میزان عوامل فومزا (قسمت وزنی) ۱ تا ۵ قسمت وزنی

در نمونه‌های گرافیت دار از ۳ قسمت وزنی به بعد، انقباض



شکل ۴ ظاهر نمونه های کامپوزیت بعد از زینتر در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد

ماندن آن در ترکیب و تاثیر بر رفتار شیشه می گردد به این صورت که با اتمام اکسیژن های موجود در یک تخلخل، بخشی از کربن در ساختار شیشه حل شده و با تاثیر گذاری بر ویسکوزیته و کاهش آن امکان خروج گازهای تولید شده و جانشین شدن مذاب ویسکوز را فراهم آورده است. به همین دلیل، نمونه های دارای کربن بیش از دو قسمت وزنی نه تنها انبساط نداشته اند بلکه منقبض نیز شده اند.

شکل (۵) میزان انقباض در ساختار کامپوزیت کربن دار را نشان میدهد.

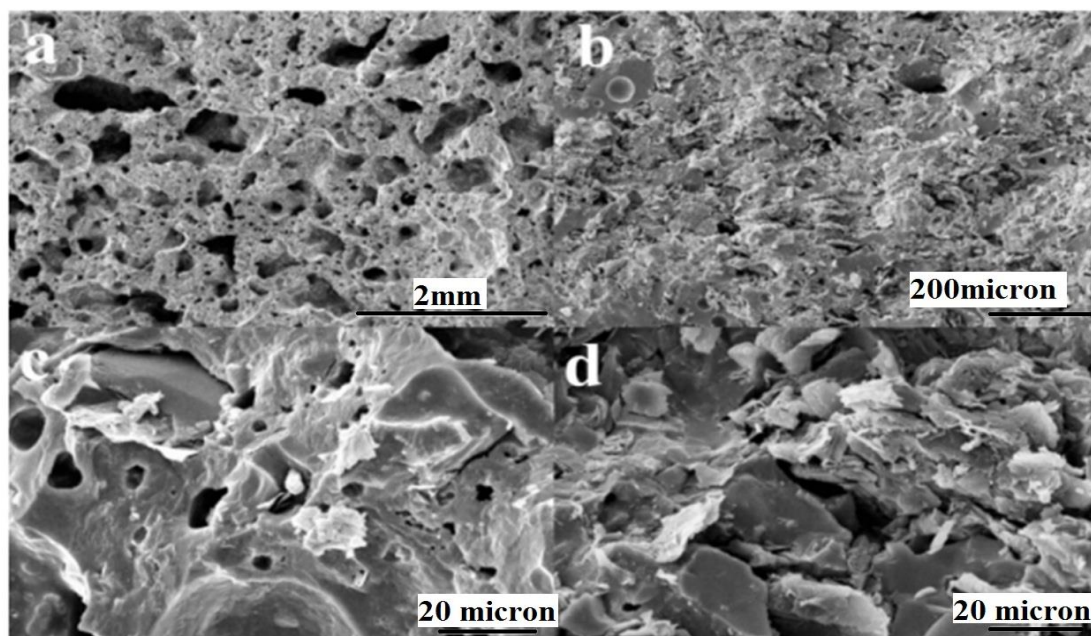
برای دریافتن میزان کربن خارج شده از ساختار کربن دو نمونه او ۵ درصد وزنی بعد از پخت اندازه گیری شد. میزان کربن باقی مانده در ترکیب ۱ قسمت وزنی معادل ۰,۲ درصد و در مورد نمونه ۵ قسمت وزنی معادل ۱ درصد وزنی بود. در نتیجه می توان گفت که با افزودن مقدار کربن مقدار بیشتری در ساختار باقی می ماند و در پی آن، با مختل کردن تاثیر کربن هایی که اکسید شده اند، روند کاهش دانسیته را، در خلاف جهت پیش می برند.

در پژوهشی عنوان شده است که در SiC تغییرات حجمی بسیاری به سبب انتقالات چند شکلی فازهای حاصل از واکنش و تجزیه، ممکن است در هنگام سرمایش فوم ها، منجر به ترک های ریز و در نتیجه نمونه های ضعیف از نظر مکانیکی شود (شکل ۶)

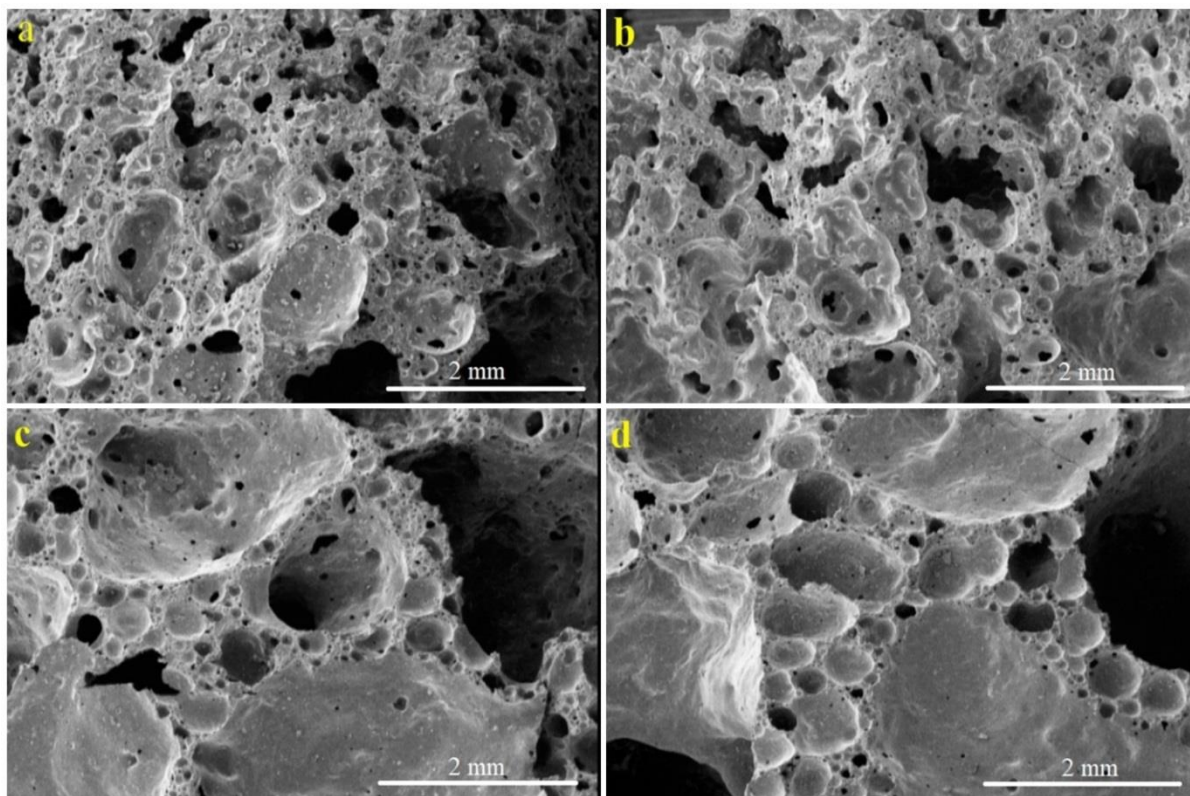
قابل ذکر است که به دلیل بالا بودن سرعت گرمایش، تجزیه $BaCO_3$ نیز سریعتر صورت گرفته و فشار ناگهانی وارد شده بر سطح، پیش از آنکه راه خروج از سطح ایجاد کنند، باعث ایجاد ترک های عمیق، و شبیه به انفجار، به ویژه در نمونه ۵ قسمت وزنی از این فومزا شده است.

از آنجایی که کربنات کلسیم بر خلاف SiC یک فوم زای حرارتی است، لذا بدون نیاز به سایر عوامل، تولید گاز میکند. بنابر همین دلیل است که با افزایش مقدار آن، بخش قابل توجهی از آن ترکیب باقی نمی ماند و تقریباً همه آن تجزیه و از نمونه خارج می گردد. CaO حاصل از تجزیه کربنات کلسیم می تواند باعث کاهش ویسکوزیته مذاب شیشه گردد. به همین دلیل، می توان بخشی از افزایش حجم زیاد در حضور کربنات کلسیم را به این موضوع نسبت داد (شکل ۴) [7]. ضمناً تجزیه سریع آن که بر خلاف SiC در بازه کوتاهی رخ میدهد و فشار گاز به طور ناگهانی افزایش یافته و بر کشش سطحی جداره های تخلخل ها غلبه میکند. این غلبه بر کشش سطحی، وقتی که در نزدیکی سطح اتفاق بیفتد، باعث ایجاد حفره سطحی و تخلخل باز می گردد [7]

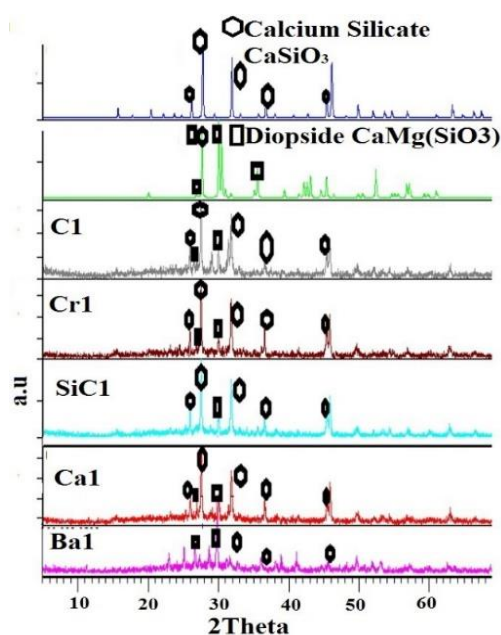
فوم زایی گرافیت، با مکانیزم واکنشی است و با ترکیب با اکسیژن در حدود ۸۰۰ درجه سانتی گراد و تبدیل شدن به گاز مونو و دی اکسید کربن باعث افزایش حجم نمونه می گردد. بنابراین افزودن مقادیر بیش از اندازه آن در ترکیب باعث باقی



شکل ۵ میکرو ساختار کامپوزیت با ۱ درصد وزنی کربن (a)، (c) و ۵ قسمت وزنی (d) و (b)



شکل ۶ تصاویر SEM از ریز ساختار نمونه کامپوزیت حاوی کربنات کلسیم (a) با یک قسمت وزنی کربنات کلسیم (b) با ۵ قسمت وزنی کربنات کلسیم



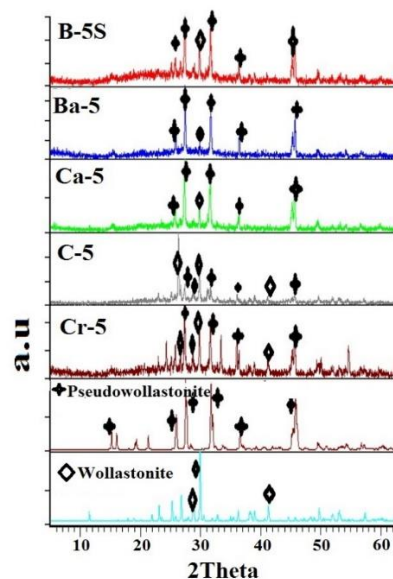
شکل ۷ تغییرات فازی کامپوزیت با عوامل فوم زا کربنات کلسیم CA و کربنات باریم BA و کربن C1 و اکسید کروم CR به میزان یک درصد وزنی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد سیلیکات کلسیم دایوپساید

بررسی فازی. همانگونه که در شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده میشود در صورت استفاده از عوامل فوم زای کربنات کلسیم و باریم و کربن و کاربید سیلیسوم به مقدار یک درصد وزنی، فازهای کلسیم سیلیکاتی $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ با نسبت مولی ۱:۱ و دایوپساید تشکیل میشود. مشخص است که فاز کریستال دایوپساید مربوط به شیشه سودالایم می باشد که تبلور آن در شیشه سودالایم قبلاً توسط دیگران گزارش شده است [6] و فاز کلسیم سیلیکاتی نیز ناشی از تبلور سرباره می باشد. اما در صورت افزایش مقدار عامل فوم زا به ۵ درصد وزنی، پیک های تبلور مربوط به دایوپساید از بین رفته و این بار فاز وولاستونیت و شبه وولاستونیت $\text{Ca}_3\text{SiO}_3, \text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ تشکیل می شود.

بنابراین در کل فازهای کلسیم سیلیکاتی وولاستونیت و شبه وولاستونیت، فاز غالب در پراش اشعه ایکس از نمونه های پخت شده است. این امر به دلیل وجود مقادیر بالای $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ در ترکیب سرباره فولاد طبیعی است. از طرفی تبدیل وولاستونیت به شبه وولاستونیت در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی گراد در فشارهای کم توسط زمین شناسان گزارش شده است که می دانیم فاز شبه وولاستونیت از نوع سیلیکات کلسیم حلقوی با ذوب غیر ناگهانی و وولاستونیت از نوع سیلیکات زنجیره ای با ذوب ناگهانی است.

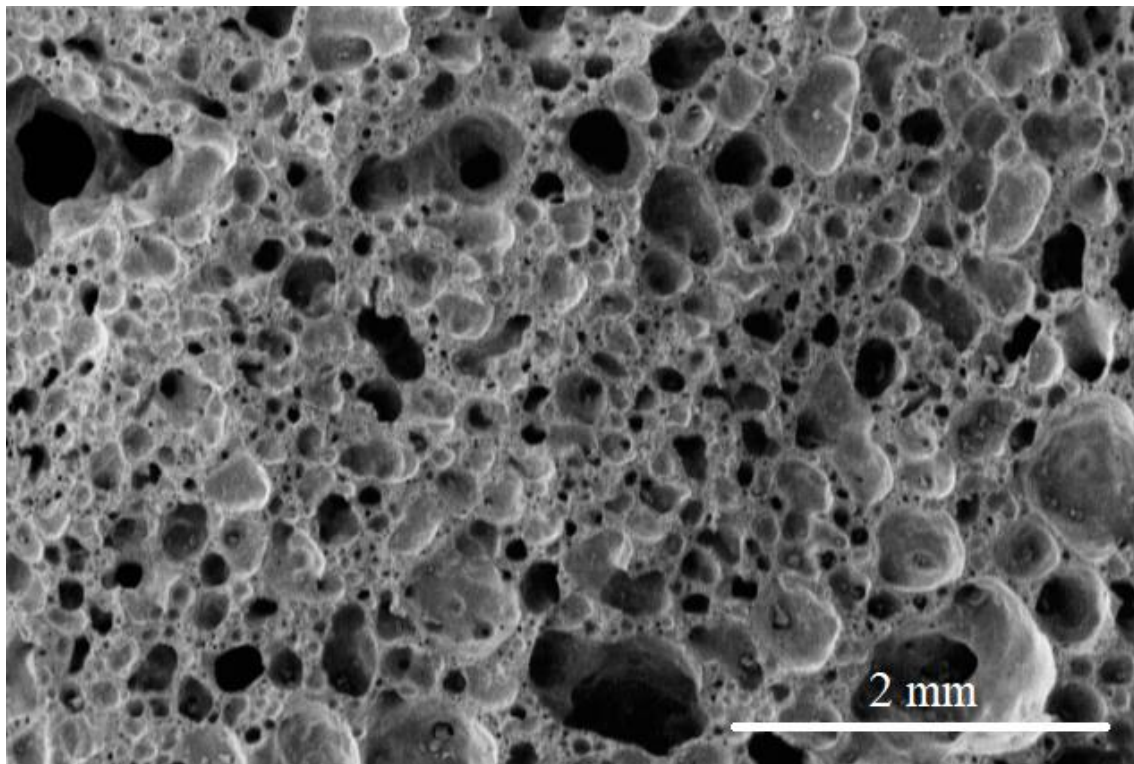
شبهه وولاستونیت جای گیرند، بنابراین تبدیل سیلیکات کلسیم CaSiO_3 در نهایت می‌تواند به وولاستونیت و $\text{Ca}(\text{SiO}_3)$ و شبهه وولاستونیت ختم گردد [9].

در مورد استفاده از فاز اکسید کروم برعکس بقیه عوامل فوم زا میزان فاز با افزایش عامل فوم زای اکسید کروم فاز وولاستونیت در درصد وزنی بیشتر آن (یعنی ۵ درصد وزنی) تشکیل می‌شود که می‌تواند دلیل بر اکسیدی شدن محیط در اثر تبدیل فازی اکسید کروم باشد و اینکه این فاز (ولاستونیت) در شرایط اکسیدی تثبیت می‌شود و تغییر فاز به شبهه وولاستونیت را با افزایش درصد وزنی اکسید کروم ندارد [10]. شکل (۹) ریز ساختار نمونه کامپوزیت حاوی اکسید کروم را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود شکل تخلخل‌ها و توزین‌ها از یکنواختی بیشتری نسبت به نمونه‌های کربناتی بر خوردار است و بیانگر این مطلب است که ایجاد فاز اکسید کروم می‌تواند به ایجاد تخلخل نیز کمک کند [11].



شکل ۸ تغییرات فازی کامپوزیت با عوامل فوم زا کربنات کلسیم CA و کربنات باریم BA و کربن C1 و اکسید کروم CR به میزان پنج درصد وزنی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد شبهه وولاستونیت و وولاستونیت

در مورد تبدیل شدن سیلیکات کلسیم به وولاستونیت از آنجا که بیشتر عناصر دیگر نیز از جمله سیلیس می‌توانند در



شکل ۹ نمونه کامپوزیت حاوی ۵٪ اکسید کروم

نظر می‌رسد به دلیل انتقالات چند شکلی فازهای حاصل از تجزیه SiC ممکن است در هنگام سرمایش فوم‌ها ترک‌های ریز ایجاد و نمونه‌ها از نظر مکانیکی تضعیف شوند.

نتیجه‌گیری نهایی

با افزودن ضایعات شیشه به سرباره به میزان ۵۰ درصد وزنی در حضور عوامل فوم‌زا کربنات کلسیم، کربن، اکسید کروم و کاربید سیلیسیوم و کربنات باریوم پخت در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کامپوزیت متخلخل به دست آمد.

نمونه حاوی ۱ درصد وزنی کربنات کلسیم با تخلخل ۸۰ درصد دارای استحکام فشاری ۴/۸ مگا پاسکال و نمونه دارای ۱ درصد اکسید کروم با تخلخل ۸۲ درصد وزنی دارای استحکام فشاری ۳/۲ مگا پاسکال و نمونه ۱ دارای یک درصد وزنی کاربید سیلیسیوم با تخلخل ۸۳ درصد دارای استحکام فشاری ۲/۵ مگا پاسکال می‌باشد.

بررسی استحکام فشاری نمونه‌های فوم‌زایی. استحکام در فوم‌ها به شدت به توزیع اندازه تخلخل‌ها وابسته است اگر چه هنوز رابطه‌ای میان توزیع تخلخل با هدایت حرارتی به اثبات نرسیده است اما استحکام به شدت متأثر از آن است [12-16]. استحکام از سه ترکیب دارای توزیع بهتر تخلخل از سه ترکیب حاوی سه نوع فوم‌زای کاربید کلسیم اکسید کروم و کربنات کلسیم تست استحکام فشاری گرفته شد. جدول (۱) میانگین استحکام فشاری این سه ترکیب را نشان می‌دهد.

جدول ۱ میانگین استحکام فشاری سه کامپوزیت در حضور عوامل فوم

زای کربناتی و کاربیدی

| نمونه | B-1SiC | B-1Cr ₂ O ₃ | B-1CaCO ₃ |
|-------------------|--------|-----------------------------------|----------------------|
| استحکام فشاری MPa | ۲/۵ | ۳/۲ | ۴/۸ |

بالاترین استحکام مربوط به فوم‌زای کربنات کلسیم و پایین‌ترین استحکام مربوط به فوم‌زای کاربید سیلیسیوم می‌باشد. به

مراجع

- Marangoni, M., Seccobc, M., Parisattocd, M., Artiolicd, G., Bernardoa, E., "Cellular glass – ceramics from a self foaming mixture of glass and basalt scoria," *Journal of Non. Crystalline. Solids*, Vol. 403, pp. 38–46, (2014).
- Pittsburgh Corning (UK) Ltd, "FOAMGLAS® for the Building Envelope." London, EC1N 8TE, PP.670-676,(1975)
- Yatsenko,E.A., B. M. Goltsman,B.M., V. A. Smolii,V.A., and A. S. Kosarev,A.S., "Foamed slag glass - Eco-friendly insulating material based on slag waste," in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2015 - Conference Proceedings*, Vol. 0124, pp. 819–823,(2015).
- Hojaji, H., "development of foam glass, structural insulation", *MRS Online Proceeding Library Archive* 136, Vol. 136, pp. 185–206, (1988).
- Vancea, C and I. Lazău, I "Glass foam from window panes and bottle glass wastes", *Central European Journal of Chemistry.*, Vol. 12, No. 7, pp. 804–811, (2014).
- Scheffler,M., Colombo. P., and Scheffler, M., "Cellular Ceramics Structure, Manufacturing, Properties and Applications", Wiley,New york. pp. 31320-4, (2006).
- Ponsot, I and E. Bernardo, "Self glazed glass ceramic foams from metallurgical slag and recycled glass", *Journal of Clean Products.*, Vol. 59, pp. 245–250, (2013).
- Ye,Z., Wang,Y., Jiang, H., Li, N. and Liu, S. "Foamed glass-ceramics made from red-mud", *Key Engineering Materials.*, Vol. 575–576, pp. 461–464, (2014).
- Arcaro, S., de B. G. Maia, O. Souza, M. T. Cesconeto, F. R. Granados, L. and de Oliveira, A. P. N. "Thermal Insulating Foams Produced From Glass Waste and Banana Leaves", *Materials Research.*, Vol. 19, No. 5, pp. 1064–

- 1069, (2016).
10. Brusatin, G., Scarinci, L. Zampieri, and P. Colombo, "Foam glass from cullet", *Glass Machinery Plants & Accessories*, (2002).
 11. Mangutova, B., Fidancevska, E., Milosevski, M., and Bossert, J., "Production of highly porous glass-ceramics from metallurgical slag, fly ash and waste glass", *Acta Periodica Technologica*, Vol. 280, No. 35, pp. 103–110, (2004).
 12. Mardi, H., Faeghinia, A., "Compressibility and Foaming behavior of steel slag/waste glass composites by particle size distribution and foam agents", *Journal of Advanced Ceramics Progress*, Vol. 5, No. 1 pp. 23-3, (2019).
 13. Khalili, M., Zamani, F., "Development of Clay Foam Ceramic as a Support for Fungi Immobilization to Biodiesel Production", *International Journal of Engineering TRANSACTIONS B: Applications*, Vol. 27, No. 11, pp. 1691-1696, (2014).
 14. Akbarpoor, S., Karbasi, S., "Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Titanium dioxide Composite Scaffold for Tissue Engineering Applications", *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol.3, No.3, pp.17-26, (2014).
 15. Nianhua Chen, N., Zhang, Sh., Pan, X., Zhou, S., "Foaming mechanism and optimal process conditions of foamed glass based on thermal analysis", *Journal of Porous Materials*, Vol. 27, pp. 621–626, (2020).
 16. Sassi, M., Jamal-Eldin, F. M., Andrea, I., "Characterization of foam glass produced from waste CRT glass and aluminium dross", *Journal of Physics Conference Series*, Vol.1527, No.1, pp. 120-137, (2020).
 17. Shahsavari, P., Eftekhari Yekta B., Marghussian, V. K., "High Strength Pyroxene-Based Glass- Ceramic Foams in the Presence of Fe₂O₃", *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp.1-10, (2020).

